

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Širokopásmová FTTx přípojka na architektuře WDM-PON
sítě**

**Broadband FTTx Connection in WDM – PON Network
Architecture**

2015

Josef Filip

Zadání bakalářské práce

Student: **Josef Filip**
Studijní program: **B2647 Informační a komunikační technologie**
Studijní obor: **2601R013 Telekomunikační technika**
Téma: **Širokopásmová FTTx přípojka na architektuře WDM - PON sítě**
Broadband FTTx Connection in WDM – PON Network Architecture

Zásady pro vypracování:

Tato práce se zabývá simulací vláknově optické sítě, která je tvořená optickou sítí WDM-PON a návazně zapojenou optickou sítí FTTx.

1. Popište technologii WDM-PON a FTTx.
2. Realizujte v softwarové aplikaci Optiwave OptiSystem model WDM-PON vláknově optické sítě s FTTx přípojkou.
3. Vyhodnoťte výsledky získané ze simulací.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KAZOVSKY, Leonid G., et al.; *Broadband Optical Access Networks*. Canada: Wiley, 2011. 283 p.. ISBN 978-0-470-18235-2.
- [2] MA, Maode. *Current Research Progress of Optical Networks*. 1st Edition. [s.l.]: Springer, 2009. 282 p. ISBN 978-1402098888
- [3] LAM, Cedric. *Passive Optical Networks: Principles and practice*. Oxford: Elsevier Onc., 2007. 324 p. ISBN 978-0-12-373853-0
- [4] DHAINI, Ahmad R. *Next-Generation Passive Optical Networks*. Saarbrücken: VDM Verlag, 2008. 132 p. ISBN 978-3836435062

Další literatura dle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Látal**


Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *5. května 2015*


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Janu Látalovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Bakalářská práce Širokopásmová přípojka FTTx na architektuře WDM-PON sítě je zaměřena na problematiku pasivních optických sítí. Cílem práce je popsat WDM-PON technologii, FTTx přípojky a následně navrhnout a nasimulovat širokopásmovou optickou síť na architektuře WDM-PON.

Bakalářská práce se skládá z teoretické a praktické části. V teoretické části bakalářské práce jsou rozebrány vlastnosti optických vláken, optické přístupové sítě s FTTx přípojkami, pasivní optická síť a její standardy. Dále se bakalářská práce zabývá standardem WDM-PON.

V praktické části je popsán návrh širokopásmové optické sítě na architektuře WDM-PON, který byl proveden v simulačním prostředí Optiwave OptiSystem 13 a budou zde popsány a zobrazeny výsledky.

Klíčová slova

Pasivní optické sítě, WDM, WDM-PON, optické přípojky FTTx, optické vlákno, směrová odbočnice AWG, Optiwave OptiSystem 13.

Abstract

Bachelor thesis Broadband FTTx Connection in WDM – PON Network Architecture deals with the passive optical network problematic. The topic of this thesis is to describe WDM-PON technology, FTTx connections and then propose and simulate broadband optical network on the architecture WDM-PON.

The thesis consists of theoretical and practical parts. In the theoretical part of the thesis are analyzed properties of optical fibers, optical access network with FTTx connections, passive optical network and its standards. Further the bachelor work deals with WDM-PON.

In the practical part is described the network design of broadband optical network architecture WDM-PON, which was made in the simulation environment Optiwave OptiSystem 13 and will be described and shown results.

Key words

Passive Optical Networks, WDM, WDM-PON, optical connections FTTx, optical fiber, AWG, Optiwave OptiSystem.

Seznam použitých zkratek

| Zkratka | Anglický význam | Český význam |
|-------------------------|---|---------------------------------------|
| 10GE-PON | 10 Gigabit Ethernet Passive Optical Network | 10 Gigabitová ethernetová optická síť |
| AON | Active Optical Newtork | Aktivní optická síť |
| APD | Avalanche photodiode | Lavinová fotodioda |
| APON | ATM Passive Optical Network | ATM pasivní optická síť |
| AWG | Arrayed Waveguide Grating | Směrová odbočnice |
| ATM | Asynchronous Transfer mode | Asynchronní přenosový režim |
| BER | Bit Error Ratio | Bitová chybovost |
| BPON | Broadband Passive Optical Network | Širokopásmová pasivní optická síť |
| CWDM | Coarse Wavelenght Division Multiplex | Hrubý vlnový multiplex |
| DFB | Distributed Feedback Laser | Distribuovaný laser se zpětnou vazbou |
| DWDM | Dense Wavelenght Division Multiplex | Hustý vlnový multiplex |
| EDFA | Erbium Doped Fiber Amplifier | Erbiem dopovaný vláknový zesilovač |
| EPON | Ethernet Passive Optical Network | Ethernetová optická síť |
| FP | Fabry-Perot laser | Fabry-Perot laser |
| FTTB | Fibre to the Building | Vlákno k budově |
| FTTC | Fibre to the Curb | Vlákno k sídlišti |
| FTTD | Fibre to the Desk | Vlákno k stolu |
| FTTE_x | Fibre to the Exchange | Vlákno do ústředny |
| FTTH | Fibre to the Home | Vlákno do domu |
| FTTN | Fibre to the Node | Vlákno do uzlu |

| | | |
|---------------|-----------------------------------|--|
| FTTO | Fibre to the Office | Vlákno do kanceláře |
| FTTP | Fibre to the Premises | Vlákno do prostoru |
| FTTx | Fibre to the „x“ | Vlákno k „x“ |
| GI | Graded Index | Plynulá změna indexu lomu |
| GPON | Gigabit Passive Optical Network | Gigabitová ethernetová optická síť |
| ISI | InterSymbol Interference | Mezisymbolové interference |
| LAN | Local Area Network | Místní síť |
| MM | Multi Mode | Vícemódový režim |
| ODN | Optical Distribution Network | Optická distribuční síť |
| OLT | Optical Line Termination | Optický linkový terminál |
| ONT | Optical Network Termination | Optický síťový terminál |
| ONU | Optical Network Unit | Optická síťová jednotka |
| P2MP | Point-To-Multipoint | Spojení bod-více bodů |
| P2P | Point-To-Point | Spojení bod-bod |
| PIN | PIN Photodiode | PIN fotodioda |
| PON | Passive Optical Network | Pasivní optická síť |
| SI | Step Index | Skokový index lomu |
| SM | Single Mode | Jednomódový režim |
| SOA | Semiconductor Optical Amplifier | Polovodičový zesilovač |
| SRS | Stimulated Raman Scattering | Stimulovaný Ramanův rozptyl |
| TDMA | Time Division Multiple Access | Mnohonásobný přístup do sítě s časovým dělením |
| WDM | Wavelength Division Multiplexing | Vlnový multiplex |
| XG-PON | X Gigabit Passive Optical Network | 10 Gigabitová optická síť |

Obsah

| | |
|--|----|
| Úvod | 1 |
| 1 Optická vlákna | 2 |
| 1.1 Vlastnosti optický vláken..... | 2 |
| 1.2 Útlum optických vláken..... | 3 |
| 1.2.1 Materiálová absorpce | 3 |
| 1.2.2 Rozptylové ztráty..... | 3 |
| 1.2.3 Ohybové ztráty | 3 |
| 1.3 Disperze optických vláken..... | 4 |
| 1.3.1 Chromaticá disperze..... | 4 |
| 1.3.2 Vidová disperze | 5 |
| 1.3.3 Polarizační vidová disperze PMD | 5 |
| 2 Optické přístupové sítě | 6 |
| 2.1 Struktura optické přístupové sítě..... | 7 |
| 2.2 FTTx .. | 7 |
| 2.3 Aktivní optická síť..... | 10 |
| 3 Pasivní optické sítě PON..... | 11 |
| 3.1 Topologie PON sítí | 11 |
| 3.1.1 Hvězdicová topologie | 11 |
| 3.1.2 Stromová topologie..... | 12 |
| 3.1.3 Sběrníková topologie..... | 12 |
| 3.1.4 Kruhová topologie | 13 |
| 3.2 Standardy PON sítí | 13 |
| 4 WDM-PON..... | 17 |
| 4.1 Technologie CWDM..... | 17 |
| 4.2 Technologie DWDM | 18 |
| 4.3 Technologie WWDM | 19 |
| 4.4 Aktivní a pasivní prvky WDM-PON sítě | 19 |
| 4.4.1 Optické zdroje | 19 |
| 4.4.2 Optické přijímače | 20 |
| 4.4.3 Optické zesilovače | 21 |

| | |
|--|----|
| 4.4.4 Pasivní optický rozbočovač..... | 23 |
| 4.4.5 AWG | 24 |
| 5 Simulace v programu OptiSystem | 26 |
| 5.1 Schéma sítě | 26 |
| 5.1.1 OLT jednotky..... | 26 |
| 5.1.2 ODN jednotka | 30 |
| 5.1.3 ONU jednotka | 30 |
| 5.2 Výsledky simulace | 32 |
| Závěr..... | 43 |
| Použitá literatura..... | 44 |
| Seznam příloh..... | 45 |
| Seznam obrázků | 46 |
| Seznam tabulek | 47 |

Úvod

Bakalářská práce Širokopásmová přípojka FTTx na architektuře WDM-PON sítě se bude zabývat pasivní optickou sítí, především standardem WDM-PON. Hlavní výhodou pasivních optických sítí je, že obsahuje pouze pasivní prvky. Ty mají větší životnost, než prvky aktivní, a proto jsou i mnohem spolehlivější. Další jejich výhodou je, že pasivní prvky nepotřebují externí napájení. WDM-PON poskytuje vyhrazenou šířku pásma sítě bod-bod a sdílení optického vlákna pro pasivní optické sítě. Architektura je podobná jako u EPON a GPON, ale namísto přístupu založeného na napájených rozbočovačů používaných u architektury TDM-PON, tak WDM-PON využívá směrovou odbočnici AWG, která odděluje vlnové délky pro jednotlivé koncové uživatele.

Cílem bakalářské práce bude popsat WDM-PON technologii, FTTx technologii a následně navrhnout a realizovat širokopásmovou FTTx přípojku na architektuře WDM-PON.

Bakalářská práce se bude skládat z 5 kapitol, které budou zahrnovat teoretickou a praktickou část. V první kapitole budou popsány optická vlákna a možné způsoby vzniku útlumu optických vláken. V druhé kapitole se bakalářská práce bude věnovat optickým přístupovým sítím, bude zde popsána základní optická přístupová síť, její struktura a aktivní optická síť. Třetí kapitola se bude zabývat pasivní optickou sítí. Kromě popisu pasivní optické sítě zde budou popsány i topologie sítí a standardy pasivních optických sítí. Jedná se o technologie APON, BPON, GPON, EPON, 10GE-PON a XG-PON. Ve čtvrté kapitole teoretické části bude popsána technologie WDM-PON, která je založena na vlnově děleném multiplexu. Dále zde budou popsány technologie CWDM, DWDM, WDM, aktivní a pasivní prvky WDM-PON sítě.

Praktická část se bude skládat z jedné kapitoly a to kapitoly páté. V této kapitole bude proveden návrh širokopásmové FTTx přípojky na architektuře WDM-PON a následně provedeny simulace v simulačním prostředí Optiwave OptiSystem 13. Jednotlivé části navržené sítě budou popsány a následně vyhodnoceny. Budou měřeny tyto veličiny: bitová chybovost, Q-faktor, výkonová a útlumová bilance a diagram oka.

1 Optická vlákna

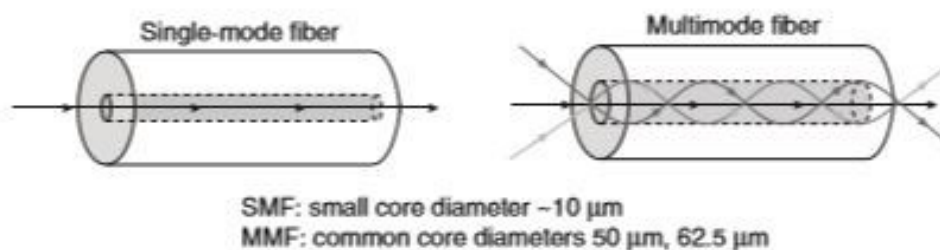
Optická vlákna jsou vlnovody válcového tvaru, které jsou tvořeny dielektrickými materiály, jako je sklo (křemenné) nebo plast. Díky své vlnodové konstrukci, udržují světelný paprsek (vid) uvnitř svého jádra a vedení optických signálů kolem svých os. Vzhledem k velké šířce pásma a nízkého útlumu jsou optická vlákna používána jako přenosové kanály pro optické komunikační systémy. Přenášejí optické signály s vysokým datovým tokem na velké vzdálenosti.

1.1 Vlastnosti optických vláken

Optická vlákna v optických komunikacích se skládají z dielektrického jádra, které je obklopené dielektrickým ochranným pláštěm a vnějším obalem. Obal je používán jako ochrana proti mechanickému poškození. Aby se světelné paprsky šířily podél vlákna, musí být index lomu jádra (n_1) větší než index lomu ochranného pláště (n_2). Zpravidla je rozdíl indexu lomu velmi malý, záleží na charakteristikách vlákna. Máme dva různé typy vláken: jednovidová (SM - singlemode) a mnohovidová (MM - multimode).

Jednovidová vlákna mají malý průměr jádra 5-8 μm , to má za následek velký úhel odrazu paprsku ve vlákne - menší prodloužení dráhy paprsku. Průměr pláště je 125 μm . Typické vlnové délky pro tyto vlákna jsou 1310 nm a 1550 nm. Vyznačují se velmi malým útlumem, malou disperzí a mají vysokou rychlost přenosu dat na velkou vzdálenost, až desítky kilometrů. Vlákem se šíří jenom jeden vid a to ve směru osy.

Mnohovidová vlákna jsou používána na kratší vzdálenosti, maximálně několik kilometrů, a proto se využívají pro místní sítě LAN (Local Area Network). Mají větší průměr jádra, nejčastěji 50 a 62,5 μm . Průměr pláště je stejný jako u jednovidových vláken. Pro tyto vlákna jsou typické vlnové délky 850 nm a 1310 nm. Jeho jádrem se šíří více paprsků světla. Podle profilu indexu lomu máme dvě odlišné provedení – vlákna se skokovou změnou indexu lomu (SI - Step Index) a gradientní vlákna (GI - Graded Index). U SI vláken se vidy šíří totálním odrazem díky velkému přechodu indexu lomu na rozhraní jádra a pláštěm vlákna. Hlavní nevýhodou těchto vláken je vidová disperze, omezující šířku přenášeného pásma. Oproti tomu jsou gradientní vlákna tvořena z tisíce tenkých vrstev, které mají odlišný index lomu. Čím dále jsou vidy od osy jádra, tím je index lomu menší. Na obrázku 1.1 je zobrazeno šíření vidu u jednovidového a mnohovidového optického vlákna.



Obrázek 1.1: Jednovidové a mnohovidové vlákno [2]

1.2 Útlum optických vláken

Útlum optických vláken znamená pokles optického výkonu na konci vedení, oproti druhému konci. Především je způsobován materiálovou absorpcí, materiálovým rozptylem, ztrátou ohybem nebo také ztrátami při spojování a na konektorech.

1.2.1 Materiálová absorpce

V křemenném skle elektrická rezonance vytváří absorpční píky (vrcholy) v ultrafialové části a molekulární vibrace absorbují infračervené vlnové délky. Ocasy těchto rezonančních vrcholů sahají do tří oken optické komunikace. Tyto vlastní materiálové ztráty stanovují základní limit pro útlum vláken, obvykle menší než 0,03 dB/km (od 1,3 do 1,6 μm). V počátečních letech přišlo velké zlepšení ve snižování ztrát díky čištění materiálu. Přechodné kovy (např. železo, měď, nikl) mohou způsobit značné absorpce ve vlnových délkách od 0,8 do 1,6 μm . Pro dosažení ztráty pod 1 dB/km musí být koncentrace nečistot z přechodných kovů snížena na 1:1000000000. Zbytky vodní páry neboli OH ionty mají rezonanční vrcholy kolem 1,39, 1,24 a 0,95 μm , znázorněné na obrázku 1.2. Vývoj nového procesu výroby vlákna vede k suchým vláknům, ve kterých jsou absorpční píky iontů eliminovány. Tento typ vláken otevírá celé pásmo vlnových délek od 1,3 do 1,6 μm pro vysokorychlostní dálkové optické komunikace.

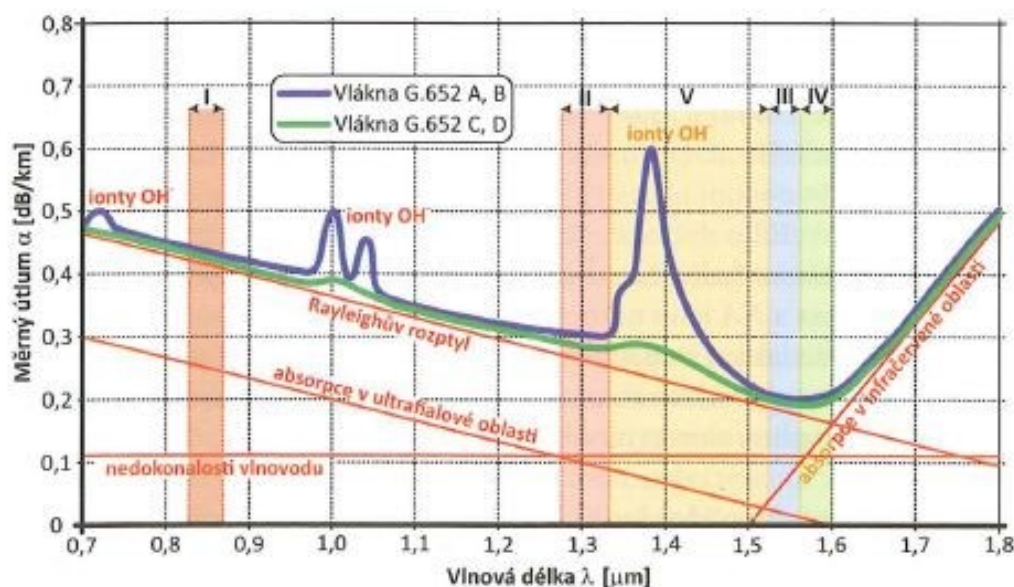
1.2.2 Rozptylové ztráty

Rozptylové ztráty jsou způsobené mikronehomogenitou indexu lomu jádra. Ty vznikají náhodným rozložením molekul v amorfním materiálu. Rayleighův rozptyl je výsledkem kolísání indexu lomu vláken. Malé výkyvy v indexu lomu jsou mnohem menší než vlnová délka optického signálu. Tyto malé výkyvy stále vedou k rozptylu světla. Rayleighův rozptyl je závislý a všesměrový. Je výraznější pro kratší vlnové délky, hlavně u jednovidových vláken pro vlnové délky od 0,8 do 1,6 μm .

1.2.3 Ohybové ztráty

Příčinou ohybů optických vláken vznikají ohybové ztráty, které porušují úplný odraz na rozhraní jádra a pláště. Tyto ohyby mění optické a mechanické vlastnosti vláken. Existují i užitečné ohyby, např. ohybové attenuátory, ohyby jako módové filtry, kontrola svárů a monitorování telekomunikačního provozu. Jsou velké až desítky mm a kritické pro jednovidová vlákna. Tyto ztráty se eliminují vhodnou konstrukcí optického kabelu.

Dále máme mikroohybové a makroohybové ztráty. Mikroohybové jsou způsobené mikrodeformacemi osy optického vlákna na rozhraní jádra a pláště, velikosti 1 - 2 μm . Mikrodeformace vznikají při výrobě optického vlákna, to znamená, že jsou mechanického původu.



Obrázek 1.2: Útlumové spektrum jednovidového optického vlákna[3]

1.3 Disperze optických vláken

Kromě útlumu optických vláken je disperze optického pulzu další škodící efekt optického přenosu v optických vláknech. Disperze vede k pulznímu rozšíření a mezisymbolové interferenci. V důsledku toho jsou dálková high-bitrate komunikační zařízení omezeny disperzí vláken. Z hlediska principu vzniku disperze se rozlišuje několik typů disperzí: chromatická disperze, vidová disperze, polarizační vidová disperze. Vidová disperze je v dnešní době eliminována používáním jednovidových vláken.

1.3.1 Chromatická disperze

Její důvod vzniku je v tom, že různé spektrální složky signálu v optickém vlákně se šíří různou rychlostí. To znamená, že když se optickým vláknem šíří signál, který je složen z více spektrálních složek, některé složky se budou zpožďovat oproti jiným. Vyskytuje se jen u jednovidových vláken. Samotná chromatická disperze se dělí na tři hlavní složky: materiálová disperze, vlnovodná disperze a profilová disperze.

Příčinou materiálové disperze je závislost indexu lomu použitého materiálu pro výrobu vlákna na vlnové délce záření. To má za následek, že se každá vlnová délka může šířit materiálem různě rychle.

Vlnovodná disperze je u mnohovidových vláken zanedbatelná, ale je důležitá u jednovidových vláken. Konstanta šíření pro každý vid je různá, tím se mění kmitočet a rychlosti šíření. Souvisí s tvarem vidového pole v jádře vlákna, a proto ji lze ovlivňovat profilem indexu lomu nebo průměru jádra. U jednovidových vláken je záporná, tudíž se dá použít pro kompenzování jiných disperzí.

Profilová disperze je dána závislostí profilu indexu lomu jádra a pláště na vlnové délce. To má za následek šíření jednotlivých vlnových délek optickým vláknem různými rychlostmi. Její hodnota je relativně malá, a proto ji lze zanedbávat.

Tyto vlivy působí v optickém vlákně společně, proto je nazýváme chromatickou disperzí. Je to předvídatelný jev, lze ho spočítat a odstranit při výrobě optického vlákna. U tras, které mají příliš vysokou hodnotu chromatické disperze, můžeme tuto hodnotu snížit použitím kompenzačních vláken nebo pomocí kompenzátoru na bázi braggovské mřížky.

1.3.2 Vidová disperze

Vidová neboli modální disperze je stanovena rozdílem zpožděním průchodu mezi nejrychlejšími a nejpomalejšími vidy. Omezuje šířku přenášeného pásma u mnohovidových vláken s homogenním jádrem. Když je úhel mezi trajektorií paprsku a osou jádra vlákna větší, pak je delší jeho dráha mezi vstupem a výstupem vlákna a jeho rychlost ve směru osy jádra je menší. Vyšší vidy se šíří pomaleji než nižší vidy. Vidová disperze je vícecestný jev, nezávislý na vlastnostech přenášeného optického signálu[1]. U jednovidových vláken je vidová disperze téměř nulová do šířky pásma 200 GHz.

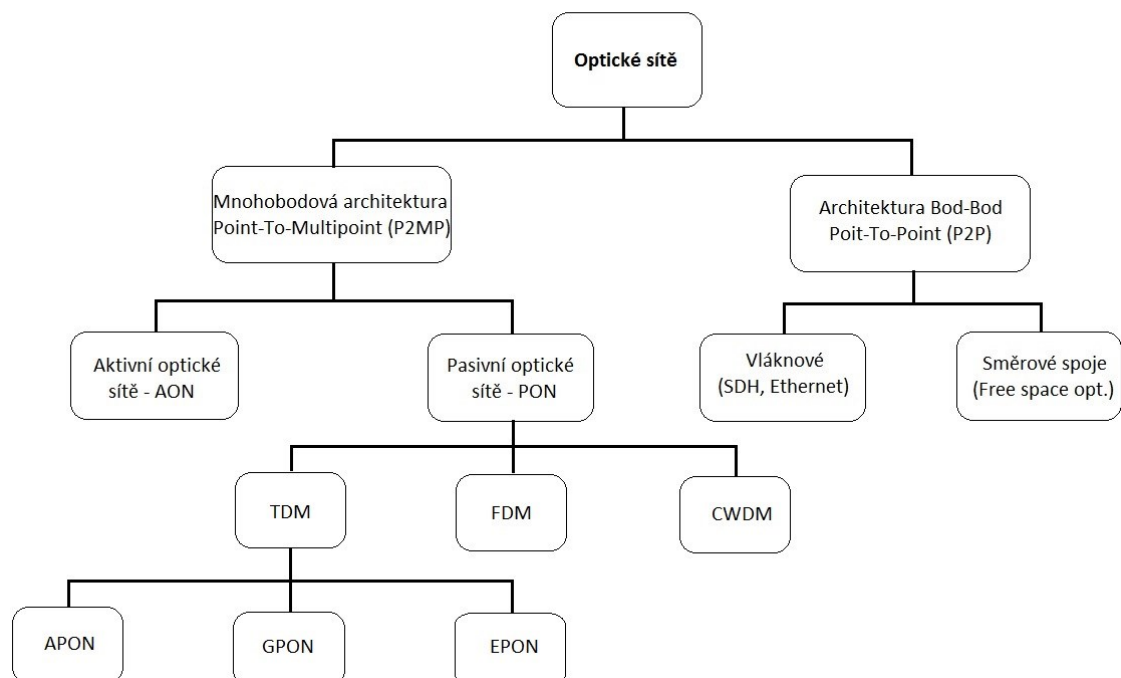
1.3.3 Polarizační vidová disperze PMD

Pro ideální optické vlákno s válcovou symetrií mají optické signály se dvěma ortogonálně polarizovanými režimy stejné konstanty šíření. Optická vlákna nemohou být dokonale válcová vlivem nerovnoměrného napětí v kabeláži optických vláken a nepravidelností geometrie vlákna. V důsledku toho, indexy vidu a konstanty šíření, spojené se dvěma ortogonálně polarizovanými optickými signály vykazují nepatrný rozdíl [1]. Pokud vstupní optický impulz rozruší oba polarizační režimy, pulz bude širší na výstupu z vlákna, protože se obě polarizační složky rozptýlí podél vlákna kvůli různým rychlostem skupin. Polarizační vidová disperze je nepředvídatelná a představuje větší problém než chromatická disperze. Závisí na celé řadě faktorů, jako je použitý materiál, vnější vlivy, instalace kabelu a je proměnná v čase.

2 Optické přístupové sítě

Vzhledem k extrémně vysoké šířce pásma a nízkého útlumu byla optická vlákna široce využívána pro rozlehlé sítě a metropolitní sítě. Do určité míry byla nasazena mnohovidová vlákna také v kancelářských budovách pro lokální počítačové sítě. Ačkoli jsou optická vlákna ideálním médiem pro vysokorychlostní komunikační systémy a sítě, jejich náklady na nasazení byly považovány za příliš vysoké v přístupové oblasti. Proto měděné dráty stále dominují v současném trhu. Nicméně rozvíjející se multimediální aplikace vytvořili tak velké nároky na šířku pásma, že technologie měděných drátů dosáhly limitů šířky pásma. Mezitím fotonické součástky s nízkými náklady a architektura pasivních optických sítí učinily optická vlákna velmi atraktivním řešením. V posledních několika letech byly různé PON architektury a technologie studovány telekomunikačním průmyslem. Několik PON norem bylo schváleno ITU-T a IEEE. FTTx se stává vspělou technologií v přímé konkurenci měděných drátů[1].

Optické přístupové sítě nám pomohly vyřešit problémy, jakou jsou: vyšší počet účastníků, větší objem datové komunikace a nárůst požadavků k navázání nových služeb. Přístupové sítě jsou stavěny na optickém principu a můžeme je rozdělit do dvou skupin, na aktivní optické sítě (AON - Active Optical Network) a pasivní optické sítě (PON - Passive Optical Network). Dále je můžeme rozdělit podle optického přístupu na architekturu a to na mnohabodovou architekturu a na architekturu bod - bod. Na obrázku 2.1 můžete vidět základní rozdělení optických sítí.



Obrázek 2.1: Základní rozdělení optických přístupových sítí

2.1 Struktura optické přístupové sítě

Základními funkčními celky optických přístupových sítí jsou podle obrázku 2.2:

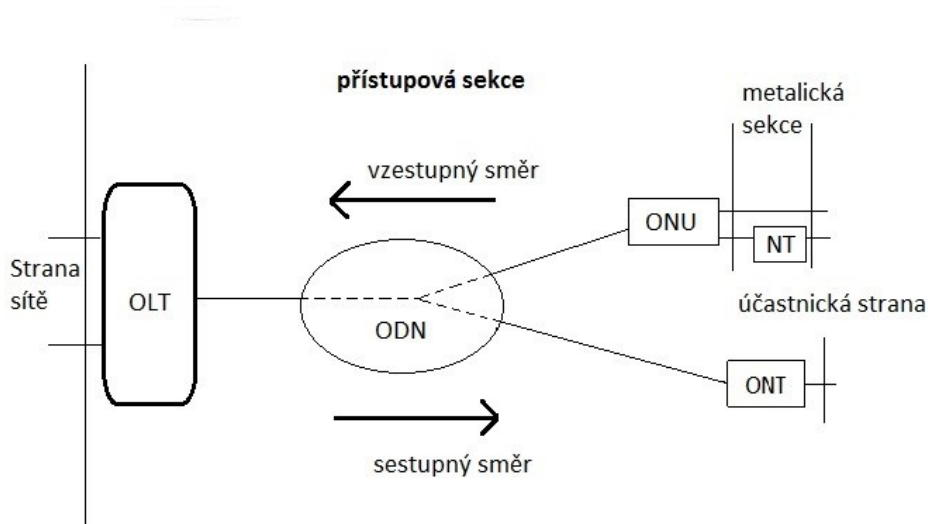
Optické linkové zakončení (OLT - Optical Line Termination) zajišťuje funkce síťového rozhraní mezi přístupovou sítí a sítěmi telekomunikačních služeb.

Optická distribuční síť (ODN - Optical Distribution Network) je soubor optických přenosových prostředků mezi OLT a jednotkami ONU, ONT [5]. Řadí se sem optická vlákna, konektory, spojky, vlnové filtry, aktivní a pasivní rozbočovače.

Optické síťové jednotky (ONU - Optical Network Unit) jsou zabezpečující funkce rozhraní mezi optickou a metalickou částí přístupové sítě [5].

Optické síťové zakončení (ONT - Optical Network Termination) je zařízení, které zprostředkovává funkce účastnického rozhraní mezi účastnickou stranou a přístupovou částí sítě.

Síťové zakončení (NT - Network Termination) je zařízení používané na straně uživatele.



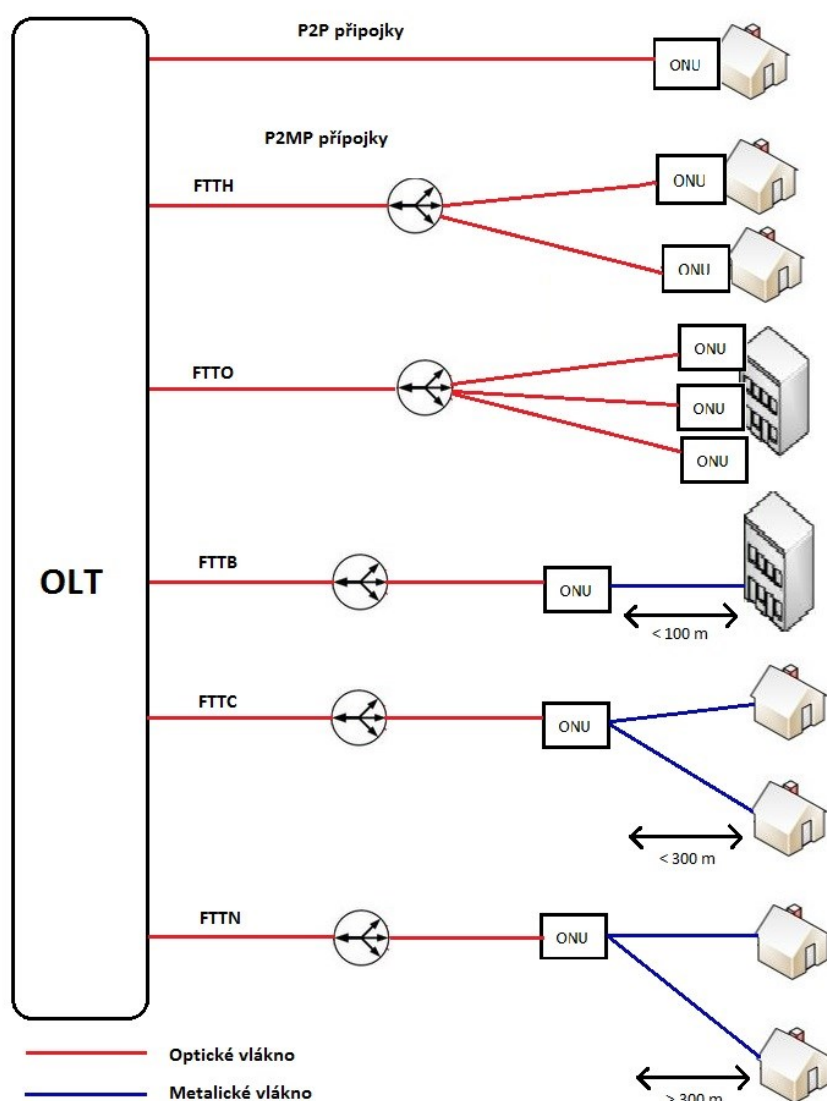
Obrázek 2.2: Funkční struktura optických sítí OAN

2.2 FTTx

Obecně lze přístupové sítě rozdělit podle způsobu realizace připojení koncového uživatele a podle umístění koncového bodu optické přístupové sítě [4]. Tento fakt respektuje označení přípojek zkratkou FTTx (Fiber to the X), kde se za písmeno "x" dosazuje identifikátor umístění koncového bodu optického segmentu přístupové sítě [4]. Optické přístupové sítě FTTx rostou naprosto spontánně a při rozvoji oboru ICT (informačních a komunikačních technologií) se na takových sítích FTTx setkáme s připojením všech klientů od malých kanceláří, firem až po velké podniky, banky, instituce, vzdělávací organizace [7]. Optická vlákna používána v sítích FTTx využívají šířku pásma až několik desítek Terabitů/s v závislosti na použitém přenosovém zařízení. Tato optická vlákna musí mít mezinárodní doporučení ITU-T G.652

nebo G.657. To znamená, že optická vlákna mají 10 000 krát větší přenosovou kapacitu, než mají metalické přípojky (1 Gbit/s). Proto je takové vlákno v optické přístupové síti skutečně širokopásmové médium a ještě má dostačující rezervu kapacity.

Existuje hodně variant, kam můžeme dovést optické vlákno. Podle způsobu umístění ukončujících jednotek ONU/ONT optických přístupových sítí a způsobu jejich provedení, tj. podle toho, kde je v síti optické vlákno ukončeno, se rozlišují různé typy optických přístupových sítí OAN[5]. Obecně můžeme rozdělit přípojky na čistě optické (FTTH a FTTO) a hybridní (opticko-metalické nebo opticko-rádiové). Označení FTTx nerozlišuje způsob realizace ani typ vlastní optické či navazující metalické části [6]. Na obrázku 2.3 máme zobrazeno několik základních FTTx přípojek.



Obrázek 2.3: Základní typy FTTx přípojek

Typy FTTx

- FTTH (Fiber To The Home) - FTTH znamená vlákno přivedeno až do domu. Optické vlákno přístupové sítě je přivedeno do objektu koncového uživatele. Jedná se o čistě optickou variantu a tak může nabídnout nejvyšší přenosové rychlosti (50 nebo 100 Mbit/s). Jeho nevýhodou je finanční náročnost, protože potřebuje výstavbu plně optických sítí a zavedení optických kabelů až ke koncovým zařízením. FTTH je určena zejména pro residenční sektor a s přihlédnutím k náročným multimediálním službám (distribuce TV vysílání a videa ve vysokém rozlišení v sestupném směru) je většinou provozována v nesymetrickém režimu z pohledu přenosových rychlostí, s rychlostí v sestupném směru vyšší než v zestupném [6].
- FTTO (Fiber To The Office) - FTTO znamená vlákno přivedeno do kanceláře. Tato přípojka také přivádí optické vlákno přístupové sítě ke koncovému uživateli. Avšak je primárně určena pro připojení kancelářských prostorů (firemní a průmyslový sektor, školy, nemocnice atd.). Proto jsou u této varianty předpokládány odlišné přenosové parametry, než je u FTTH. Kvůli velkému požadavku na objem odesílaných dat ve vstupném směru je FTTO většinou používána v symetrickém režimu přenosových rychlostí. Má vyšší nároky na spolehlivost a ochranu dat proti výpadkům, proto tyto varianty mají zálohovací sítě. Také mají vyšší nároky na rychlost odezvy.
- FTTP (Fiber To The Premises) - FTTP znamená vlákno přivedeno do prostoru. Touto zkratkou jsou souhrnně označovány obě výše uvedené varianty FTTH a FTTO[4].
- FTTB (Fiber To The Building) - Vlákno přivedeno do budovy (FTTB) je první možnou kombinací optické a navazující metalické sítě. FTTB je určena pro připojení obytných komplexů či větších budov. Optická síťová jednotka ONU nebo jednotka síťového zakončení ONT se nachází v suterénu budovy. V těchto jednotkách je optická síť zakončena a výstupní rozhraní ONU/ONT je realizováno na bázi metalického Ethernetu 1 Gbit/s. V jednotce ONU je přepínač nebo směrovač obsažen, a pokud není, tak se k tomu připojí. Jednotliví koncoví uživatelé v rámci budovy jsou k přepínači připojeni lokální datovou sítí pomocí strukturované kabeláže a standardních kabelů typu UTP, která je omezena délkou na 100 metrů [4]. Díky možnosti využití metalických rozvodů a sítí je výhodou FTTB přípojky její úspora nákladů na pokrytí celé budovy.

- FTTC, FTTCab (Fiber To The Curb, Fiber To The Cabinet) - Vlákno přivedené k okraji chodníku FTTC či vlákno přivedené ke kabinetu mají zakončení optické sítě od koncových uživatelů ve větší vzdálenosti (100-300 metrů). Optická síťová jednotka ONU je instalována ve venkovním rozvaděči, ke kterému jsou koncové body sítě připojeny metalickými kabely, nebo je volně na stojícím sloupku poblíž skupiny budov. Spolu s jednotkou ONU je zde připojen DSLAM (digitální multiplexor) a dále jsou zde využity místní metalické rozvody pro připojení koncových uživatelů. Tyto zařízení mají vyšší požadavky na klimatickou odolnost. Kvůli větší vzdálenosti než u FTTB se zde využívají digitální přípojky xDSL (místo lokální datové sítě) propřipojení koncových uživatelů. Nejvíce využívána je varianta VDSL2 s implementovanou modulací VDMT, která umožňuje dosáhnout vysokých přenosových rychlostí.
- FTTN (Fiber To The Node) - Vlákno přivedené do distribučního uzlu, který je ve vzdálenosti od 300 metrů od budov. Pomocí metalického vedení je odtud možné připojit velké množství koncových uživatelů. Podobně jako u FTTC je optická síťová jednotka ONU a digitální multiplexor DSLAM instalován ve venkovním rozvaděči. Kromě digitální přípojky VDSL2 je možnost využít i ADSL2+ pro delší vzdálenosti. Ale použitím ADSL2+ se více sníží maximální přenosová rychlost.
- FTTEx (Fiber To The Exchange) - Vlákno přivedené do ústředny stojí na rozhraní optických a metalických přípojek. Optické vlákno je přivedeno jen do lokální digitální ústředny obsahující DSLAM. Pro připojení přístupové sítě ke koncovým uživatelům se využívá technologie ADSL2+.
- FTTD (Fiber To The Desk), FTTU (Fiber To The User) - Tyto přípojky představují zakončení optické sítě nejbližší danému účastníkovi. U FTTD je optické vlákno přivedeno do síťové zásuvky poblíž pracovní stanice. Je zde použit krátký metalický kabel pro připojení koncového zařízení do zásuvky. U FTTU je optické vlákno připojeno přímo k pracovní stanici.

2.3 Aktivní optická síť AON

Aktivní optická síť AON (Active Optical Network) se nachází mezi OLT a ONU jednotkami a obsahuje aktivní síťové prvky, např. opakovače, zesilovače, rozbočovače, multiplexory nebo demultiplexory. Tyto prvky musí být elektricky napájené, a proto je nezbytností zahrnutí infrastruktury napájecí sítě. Tato síť využívá obě topologie P2P (Point to Point) i P2MP (Point to Multipoint). Na rozdíl od pasivních optických sítí PON (Passive Optical Network) dosahují větších vzdáleností, ale jejich nevýhodou jsou vyšší náklady na jejich instalaci a provoz. AON sítě se nejčastěji dělají tam, kde máme vysoké požadavky na šířku pásma, či kde je větší vzdálenost mezi OLT a koncovými zařízeními.

3 Pasivní optické sítě PON

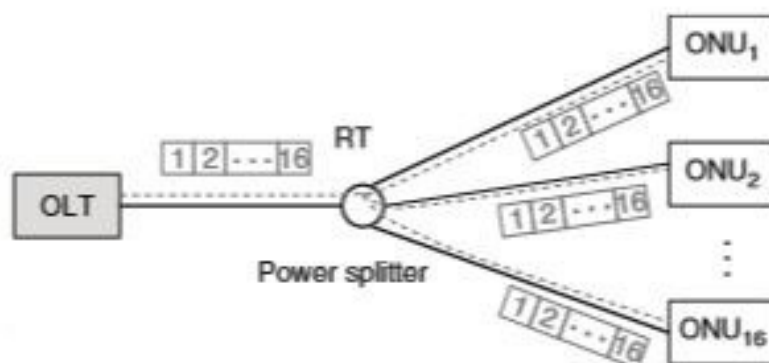
Už z názvu vyplývá, že se mezi ústřednou a uživatelským prostorem nenacházejí aktivní prvky. Ty existují jenom v ústředně a v uživatelském prostoru. V dané síti pracují rozbočovače a děliče nezávisle na napájení. Rozbočovače jsou jedinými pasivními prvky v PON a skládají nebo rozdělují daný optický signál v závislosti na směru komunikace.

Z centrální ústředny vede jednovládné optické vlákno k pasivnímu rozbočovači, který se nachází v blízkosti uživatelského prostoru. Rozbočovač má 1:N výstupních portů (1:N je rozbočovací poměr, který definuje množství uživatelů připojených k rozbočovači). Tyto porty jsou připojeny ke koncovým uživatelům pomocí jednovládných vláken (distribuční vlákna). Proto se jedná o spojovací topologie P2MP. Podle současných norem je v pasivní optické síti přenosová vzdálenost omezena na maximálně 20 km.

Podle použitého standardu se nám liší hodnoty rozbočovacího poměru, většinou se jedná o velikosti 1:32 a 1:64.

Pomocí rozbočovačů můžeme levně a jednoduše rozšiřovat celou síť. Další výhodou jsou nižší náklady na provoz a údržbu této sítě a je zde menší riziko poruchovosti jednotlivých prvků.

Na obrázku 3.1 máme znázorněnou jednoduchou PON architekturu.

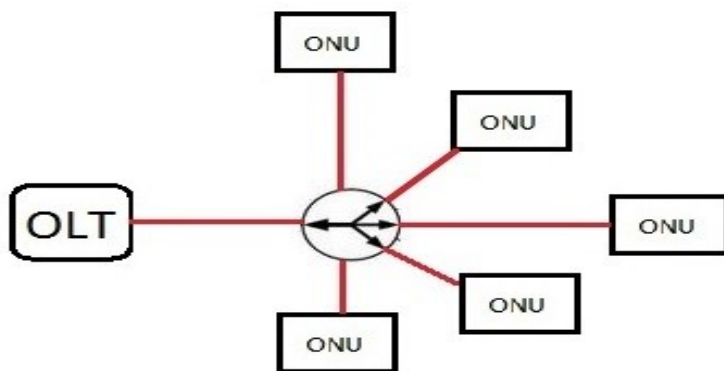


Obrázek 3.1: Architektura PON [2]

3.1 Topologie PON sítí

3.1.1 Hvězdicová topologie

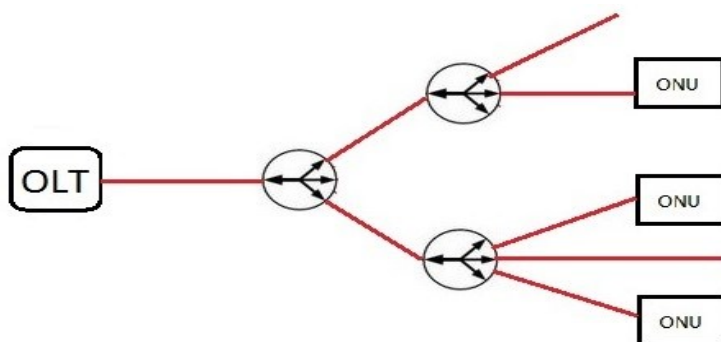
Hvězdicová topologie je podobná stromové topologii. V této topologii je použit pouze jeden rozbočovač, z kterého vedou jednotlivá optická vlákna do každého koncového zařízení ONU. Hvězdicová topologie je vhodná pro sítě s menší vzdáleností koncových zařízení od rozbočovače.



Obrázek 3.2: *Hvězdicová topologie*

3.1.2 Stromová topologie

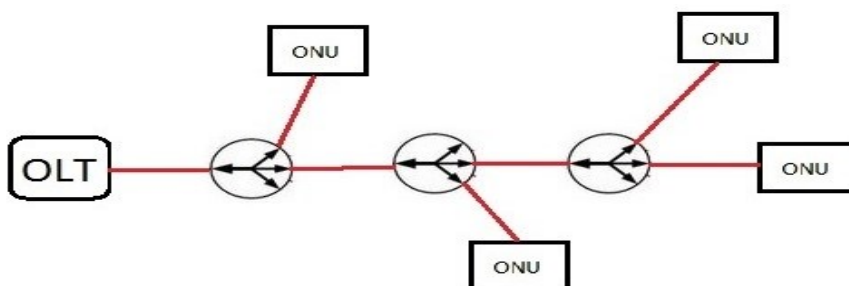
Nejvíce používanou topologií pro pasivní optické sítě je stromová topologie. Tato topologie vychází z hvězdicové topologie, ale využívá více rozbočovačů. Výhodou je použití menšího množství optických vláken, a pokud v síti selže jeden optický prvek, tak ostatní části této sítě mohou dále fungovat.



Obrázek 3.3: *Rozšířená stromová topologie*

3.1.3 Sběrníková topologie

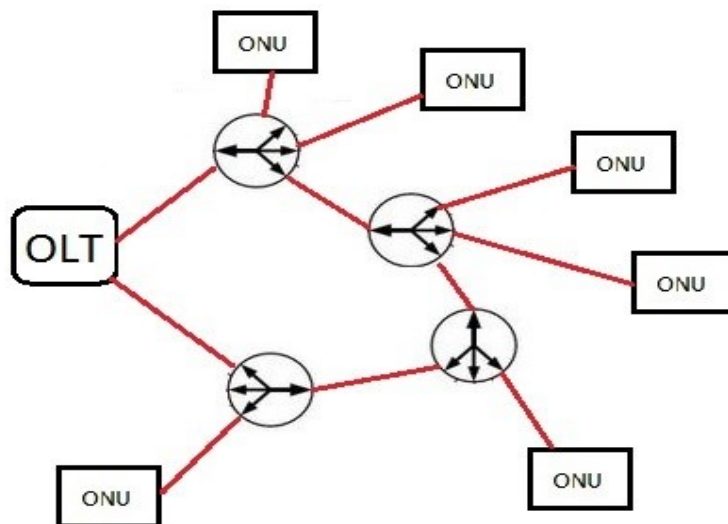
U sběrníkové neboli univerzitní topologie zprostředkovává spojení jedno přenosové médium (sběrnice). Ke sběrnici jsou připojeny všechny uzly sítě. Výhodou je, že přidáním dalšího rozbočovače je možné rozšířit tuto síť, ale nevýhodou je, že se tím zvětší vložný útlum na trase.



Obrázek 3.4: *Sběrníková topologie*

3.1.4 Kruhová topologie

Kruhová topologie je vhodná pro použití u metropolitních sítí. Pokud dojde k přerušení části vedení, tak od OLT jednotky k ONT zařízení lze dosáhnout pomocí druhého směru trasy. Pokud je použita vhodná koncová zařízení, tak může být provoz této sítě zálohován.



Obrázek 3.5: Kruhová topologie

3.2 Standardy PON sítí

Historie PON sítí se datuje od devadesátých let dvacátého století. WDM-PON, APON, BPON, GPON a XG-PON jsou standardizované organizací ITU (International Telecommunication Union). EPON a 10GE-PON jsou standardizované institucí IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Jednotlivé standardy si popíšeme níže. Standardu WDM-PON bude věnována kapitola 4.

APON

APON (ATM Passive Optical Network) byl prvním schváleným standardem Mezinárodní telekomunikační unie ITU jako standard ITU-T G.983.1 v roce 1998. Tento standard je založen na technologii ATM (Asynchronous Transfer mode). Nabízí dvě varianty: symetrický přenos, kdy je přenosová rychlost 155,52 Mbit/s a asymetrický přenos, kdy máme přenosovou rychlost 622,08 Mbit/s v sestupném směru a 155,52 Mbit/s ve vzestupném směru. Obousměrná komunikace probíhá po jednom vlákně, využívající různé vlnové délky. V dopředném směru to je 1480-1500 nm a ve zpětném směru 1260-1360nm. V případě APON může být připojeno až 32 koncových zařízení.

BPON

BPON (Broadband Passive Optical Network) je standard, který vychází ze standardu APON. Byl specifikován v roce 2001 Mezinárodní telekomunikační unií ITU jako standard ITU-T G.983.3. Do BPON standardu byla přidána vlnová délka 1550 nm pro video přenos. Byla zde i navýšena přenosová rychlost díky zvětšení počtu ATM buněk v rámcích. U asymetrického přenosu jsou stejné přenosové rychlosti, ale u symetrického přenosu je pro sestupný i vzestupný směr rychlost 622,08 Mb/s. Může zde být připojeno až 64 koncových zařízení.

GPON

GPON (Gigabit Passive Optical Network) je nástupcem standardu BPON. Tento standard byl specifikován v roce 2003 Mezinárodní telekomunikační unií ITU jako standard ITU-T G.984. GPON pro přenos využívá ATM buňky a GEM (GPON Encapsulation Method) protokol. GEM protokol je použit pro přenos rámců proměnné délky. ATM buňky a GEM rámce jsou přenášeny společně v jednom rámci s pevně danou délkou 125 μ s. To nám umožňuje nasazení paketově orientovaných služeb jako Ethernet nebo IP. Úmyslem GPON standardu bylo navýšení koncových zařízení až na 64 nebo 128 a zvýšení přenosové rychlosti. Přenosová rychlost je 1244,16 Mb/s nebo 2488,32 MB/s pro oba směry. GPON pracuje na vlnových délkách 1480 – 1500 nm v sestupném směru a 1260 – 1360 nm ve vzestupném směru. Pro přenos videa se používají vlnové délky 1550 – 1560 nm.

EPON

EPON (Ethernet Passive Optical Network) někdy označovaný jako GEPON (G- Gigabit) je standard, který byl specifikován v roce 2004 Institutem pro elektrotechnické a elektronické inženýrství IEEE jako standard IEEE 802.3ah. EPON využívá pro přenos ethernetové rámce a také využívá časového dělení multiplexů TDM. Pracuje pouze v symetrickém provozu s rychlostí 1,25 Gb/s v obou směrech. EPON pracuje na vlnových délkách 1480 -1500 nm v sestupném směru a 1260 - 1360 nm ve vzestupném směru. U EPON standardu je možné připojit až 32 koncových zařízení a dosah této sítě je 20 km.

10GE-PON

10GE-PON (10 Gigabit Ethernet Passive Optical Network) navazuje na standard EPON a byl specifikován v roce 2009 institucí IEEE jako standard 802.3av. Kromě symetrického přenosu nám nabízí i asymetrický přenos. Přenosová rychlost u symetrického přenosu

je 10,3125 Gb/s v obou směrech a u asymetrického přenosu je přenosová rychlost v sestupném směru 10,3125 Gb/s a ve vzestupném směru 1,244 Gb/s. Standard 10GE-PON jak standard EPON pracuje na stejných vlnových délkách a to 1480 -1500 nm v sestupném směru a 1260 - 1360 nm ve vzestupném směru. Byly zde přidány vlnové délky 1575 – 1580 nm, které využívají vlnový multiplex WDM. U 10GE-PON standardu je možné připojit až 32 koncových zařízení a dosah sítě je 20 km. U asymetrické varianty je výhodou, že není potřeba použít drahé optické zdroje a nasazuje se hlavně tam, kde není potřeba velkých přenosových rychlostí ve zpětném směru. Proto se hodí pro koncové uživatele využívajících služeb IPTV a internetu.

XG-PON

XG-PON (X Gigabit Passive Optical Network) je nástupcem standardu GPON a byla specifikována roku 2010 Mezinárodní telekomunikační unií ITU jako standard ITU-T G.987. Cílem tohoto standardu bylo navýšení přenosové rychlosti a zachování kompatibility s původním GPON standardem. XG-PON pracuje na vlnových délkách 1575 – 1580 nm v sestupném směru a 1260 – 1280 nm ve vzestupném směru. Pro lepší orientaci v dané problematice a pro posouzení všech potencionálních směrů vývoje byly vytvořeny dvě pracovní skupiny, které se zabývaly dvěma hlavními oblastmi [4]. A to NG-PON1 a NG-PON2.

NG-PON1 (Next-Generation Passive Optical Network) zachovává zpětnou kompatibilitu a koexistenci s předchozí generací sítí GPON. Navýšení přenosových rychlostí můžeme dosáhnout dílčími úpravami na fyzické a spojové vrstvě a použitím vhodného přenosového protokolu. Na rozdíl od NG-PON1 nám NG-PON2 nezachovává zpětnou kompatibilitu a koexistenci s předchozí generací sítí GPON. NG-PON2 pro navýšení rychlostí využívá například vlnové dělení WDM, optické kódové dělení OCDM či nové optické prvky v rámci distribuční sítě apod. Ačkoliv jsou obě varianty specifikovány v doporučení ITU.T G.987, tak byla reálně schválena jen varianta XG-PON1 a XG-PON2 byla označena jako ve vývoji FFS (For Future Study). Rozdílem těchto variant je jejich přenosová rychlost, kdy XG-PON1 nabízí 2,48832 Gbit/s a XG-PON2 nabízí 9,95328 Gbit/s ve vzestupném i v sestupném směru.

Pro zajištění zpětné kompatibility s původní sítí GPON bylo nutné zvolit vhodná pásma vlnových délek pro přenos v obou směrech. Proto XG-PON pracuje na vlnových délkách 1575-1580 nm pro sestupný směr, které jsou stejné jako u 10GE-PON a pro vzestupný směr pracuje na vlnových délkách 1260 – 1280 nm. Vzájemná koexistence GPON a XG-PON je vyřešena separací vlnových délek obou variant pomocí WDM. Standard GPON pro vzestupný směr pracoval na vlnových délkách 1260 - 1360 nm a z důvodu kolize obou standardů muselo být upraveno rozmezí vlnových délek na 1290 – 1330 nm, aby nezasahovalo do pásma vyhrazeného pro standard XG-PON. Tato změna byla provedena vydáním doplňku ITU-T G.984.5, ve kterém je specifikováno použití dodatečné vlnové výhybky označené jako WDM1r, která obsahuje potřebné vlnové filtry. Bylo nutné obdobné filtry aplikovat i v rámci centrální jednotky OLT a v koncových jednotkách ONT a ONU.

Maximální vzdálenost u standardu XG-PON byla omezena na 20 – 40 km. Ale byly navrženy varianty s prodlouženým dosahem až 60 km. Maximální počet koncových uživatelů, které můžeme připojit k centrální jednotce OLT pomocí rozbočovačů je 256.

| Varianta PON | APON | BPON | GPON | EPON | 10GE-PON | XG-PON |
|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Standard | ITU-T G.938.1 (1998) | ITU-T G.938.3 (2001) | ITU-T G.984.1 (2003) | IEEE 802.3ah (2004) | IEEE 802.3av (2009) | ITU-T G.987 (2010) |
| Protokol | ATM | ATM | ATM/ GEM | Ethernet | Ethernet | XGEM |
| Max. rozbočovací poměr | 1:32 | 1:32 | 1:128 | 1:32 | 1:32 | 1:256 |
| Vzdálenost fyzická [km] | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Vzdálenost logická [km] | 20 | 20 | 60 | 20 | 20 | 60 |
| Max. přenosová rychlost Upstream [Mbit/s] | 155,52 | 622,08 | 2488,32 | 1250 | 10312 | 9953 |
| Max. přenosová rychlost Downstream [Mbit/s] | 622,08 | 1244,16 | 2488,32 | 1250 | 10312 | 9953 |
| Vlnová délka Upstream [nm] | 1260 -1360 | 1260 -1360 | 1260 -1360 | 1260 -1360 | 1260 -1360 | 1260 -1280 |
| Vlnová délka Downstream [nm] | 1480-1500 | 1480-1500 | 1480-1500 | 1480-1500 | 1575-1580 | 1575-1580 |

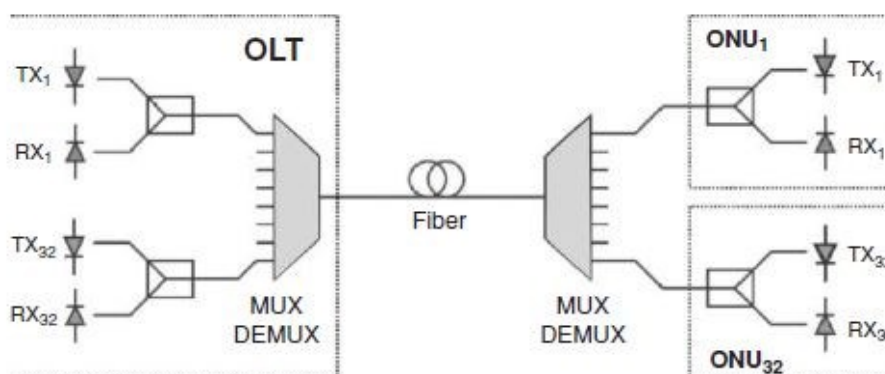
Tabulka 3.1: Porovnání jednotlivých standardů PON

4 WDM-PON

WDM-PON (Wave Division Multiplex Passive Optical Network) jsou generací pasivních optických sítí, které pro přenos využívají vlnový multiplex WDM. Předešlé varianty PON sítí využívají časové dělení TDMA, které se z hlediska přenosových parametrů blíží ke své pomyslné výkonnostní hranici. Proto další generace optických přístupových sítí využívá pro přenos vlnový multiplex WDM, který umožňuje větší množství oddělených vlnových délek do společného vlákna. To znamená, že můžeme několikanásobně navýšit kapacitu původních optických tras. WDM-PON můžeme nasadit i na stávající optické sítě, ale jen za předpokladu výměny jednotlivých zařízení. Nevýhodou WDM-PON je vyšší cena než u předešlých sítí.

Existují také sítě, které využívají kombinaci vlnového a časového dělení (WDM-TDMA PON – jedná se o hybridní přístupovou síť). Díky této kombinaci dochází ke zvýšení maximálních přenosových rychlostí.

Jak už bylo řečeno, WDM-PON technologie je založena na dělení vlnových délek. To znamená, že ke každému účastníkovi je přidělena jedna vlnová délka. To umožňuje uživateli využít nejvyšší přenosové rychlosti a poskytnout mu lepší ochranu. U předešlých PON sítí sdíleli všichni uživatelé stejnou vlnovou délku, to má za následek omezení vysokých přenosových rychlostí pro jednotlivé uživatele. Výhodou WDM-PON je nezávislost jednotlivých kanálů. Tato komunikace u těchto sítí je velmi podobná P2P (Point To Point) spojením, ale používá se jen jedno vlákno.



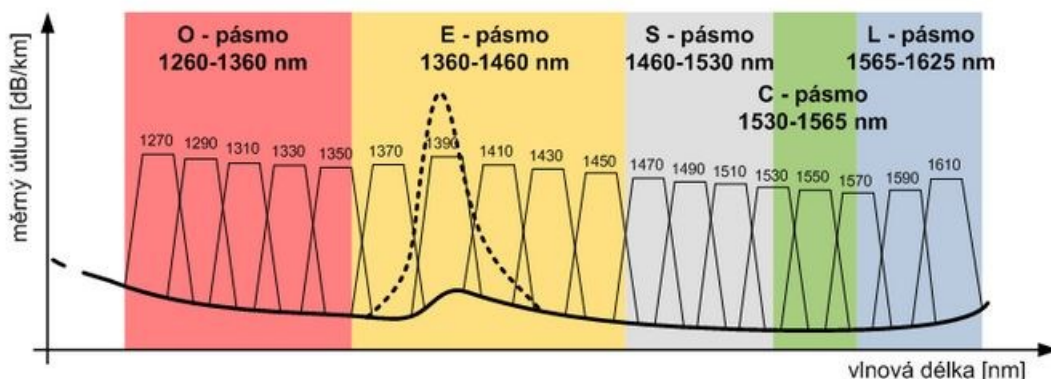
Obrázek 4.1: WDM pasivní optická síť [1]

4.1 Technologie CWDM

Technologie CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex) neboli hrubý vlnový multiplex byl standardizován v rámci doporučení ITU-T G.694.2. U CWDM byly definovány relativně široké kanály a dostatečná tolerance pro oddělení jednotlivých nosných. Důvodem definování větší šířky kanálů a dostatečné tolerance bylo kvůli použití levnějších optických zdrojů s širší spektrální charakteristikou a s nižší přesností a stabilitou vlnové délky generovaného zařízení. Pro jednovlákenná vlákna z doporučení ITU-T G.652 je definováno 18 nosných kanálů v 5 pásmech. Přehled všech kanálů a pásem můžete vidět na obrázku 4.2. Pro hrubé vlnové dělení

CWDM byly definovány jednotlivé kanály se středem první nosné vlnové délky 1271 nm a poslední 1611 nm, s odstupem mezi jednotlivými nosnými 20 nm a tolerancí nosné $\pm 6-7$ nm [4]. CWDM technologie se v praxi využívá na úrovni metropolitních sítí MAN (Metropolitan Area Network), kde je vzdálenost v řádech desítek kilometrů.

Hlavní výhodou je jeho jednoduchost a nenáročnost na implementaci a jako zdroj je možné použít levné nechlazené optické zdroje, nebo laserové diody s vertikálním směrem vyzařování VCSL (Vertically Cavity Surface Emitting Laser). Díky širokým roztečím a tolerancemi mezi jednotlivými kanály není nutnost použití drahých a přesně laditelných filtrů.



Obrázek 4.2: Kanály CWDM definované dle ITU-T G.694.2 [9]

Pásmo O (Original - původní) je původní přenosové pásmo v oblasti 1310 nm. Je vhodné pro přenos dat až do vzdálenosti 60 km.

Pásmo E (Extended - rozšířené) je použitelné u nových druhů vláken ve standardu ITU-T G.652.C.

Pásmo S (Short - krátké) je pásmo s kratšími vlnovými délkami. Je nejvíce používané pro CWDM.

Pásmo C (Conventional) je jedním z nejvíce používaných pásem u WDM. Je vhodný pro větší vzdálenosti, kvůli hodnotě měrného útlumu, která dosahuje hodnot jen 0,2 dB/km.

Pásmo L (Long – dlouhé) slouží hlavně pro WDM přenosy. Hodnota měrného útlumu je minimální a často se používá při rozšíření C- pásma. To vede k navýšení přenosové kapacity.

4.2 Technologie DWDM

Technologie DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) neboli hustý vlnový multiplex byl standardizován v rámci doporučení ITU-T G694.1 a patří mezi nejdokonalější technologie. Oproti CWDM se u DWDM multiplexování využívají pouze C a L pásma a část S pásma. Jedná se o vlnové délky od 1490nm do 1620nm. Pro DWDM byly definovány mnohem užší kanály s menší tolerancí a roztečí. Odstup mezi jednotlivými kanály je 0,1nm (u UDWDM-Ultra DWDM) až po 0,8nm. Pro docílení tak malých rozestupů mezi kanály se musí použít co nejpresnější optické zdroje s extrémně úzkou spektrální čarou. Proto se nejčastěji jako optické

zdroje používají DFB (Distributed Feedback Laser) lasery. Avšak tyto optické zdroje jsou drahé a i jejich provoz z hlediska energetické náročnosti je finančně nákladný. Proto se DWDM používá převážně v páteřních optických sítích (pro přenosy na velké vzdálenosti), kde je potřeba zajistit vysoké přenosové rychlosti pomocí velkého počtu DWDM kanálů. Další odlišností DWDM od CWDM je možnost využití tzv. flexibilních kanálů. Kdy kromě pevně definovaných kanálů je možnost vytvářet i flexibilní kanály o různé šířce a ty lze kombinovat se standardními kanály DWDM. Ale nesmí docházet k jejich vzájemnému rušení.

DWDM multiplexování umožňuje využití čtyř druhů kanálů s různou šířkou:

- Kanály se šířkou 12,5 GHz – odpovídají rozteči vlnových délek cca 0,1 nm
- Kanály se šířkou 25 GHz – odpovídají rozteči vlnových délek cca 0,2 nm
- Kanály se šířkou 50 GHz – odpovídají rozteči vlnových délek cca 0,4 nm
- Kanály se šířkou 100 GHz – odpovídají rozteči vlnových délek cca 0,8 nm

4.3 Technologie WWDM

Technologie WWDM (Wide Wavelength Division Multiplex) neboli široký vlnový multiplex patří mezi starší technologie, která se občas používá i v dnešní době kvůli nízkým nákladům. WWDM nejčastěji používá čtyři vlnové délky v oblasti 1310 nm s odstupem do 20 nm mezi jednotlivými kanály. Využívá se především pro přenos Gigabit a 10Gigabit Ethernetu.

4.4 Aktivní a pasivní prvky WDM-PON sítě

4.4.1 Optické zdroje

Optické zdroje dělíme do dvou základních skupin:

- Koherentní – LD (Laser Diode) diody
- Nekoherentní - LED (Light Emitting Diode) luminiscenční diody

U optických pasivních sítí WDM-PON se používají laserové zdroje (DFB lasery a FP lasery). Laserové diody na rozdíl od LED diod mají výrazně užší spektrální čáru a vysoký jas. Používají se pro přenosy na větší vzdálenosti, kde je potřeba vyzařovat více vlnových délek v úzkém svazku. Laserové diody jsou náročnější na spotřebu energie, teplotní stabilizaci a jsou dražší. Také je u nich velká pravděpodobnost poruch.

DFB lasery

DFB (Distributed FeedBack) lasery s rozprostřenou zpětnou vazbou jsou jednomódové lasery. Pracují na určitých vlnových délkách mezi 760 a 2800 nm. Těsně u aktivní vrstvy je naleptána difrakční mřížka, která plní roli optického rezonátoru. Tato difrakční mřížka působí i jako optický filtr, tudíž je jen velmi nízké spektrum vlnových délek odraženo zpět do aktivní

oblasti. Jedná se o vlnové délky menší než 1 nm. DFB lasery jsou vhodné pro WDM technologie a používají se hlavně v optických komunikacích.

FP lasery

FP (Fabry-Perot) lasery jsou mnohamódové lasery s rozsahem od 760 do 2800 nm. Tyto lasery jsou tvořeny dvěma polopropustnými zrcadly, která jsou umístěna na protilehlých stěnách polovodiče. Mezi zrcadly je aktivní oblast, kde se odráží světlo zpět a dále, a tak vytváří stojaté vlnění. Rezonátor bývá polopropustný jen z jedné strany, aby mohl dosáhnout lepší směrovost záření. FP lasery mohou pracovat v jednomódovém i v mnohomódovém režimu a nevyžadují teplotní či frekvenční stabilizaci. Jsou také mnohem levnější variantou optického zdroje. Tyto lasery se používají pro kratší vzdálenost, kvůli jeho větší šířce spektrální čáry.

Laditelné lasery (Tuneable Laser)

Cena laditelných laserů je výrazně dražší než u obvyklých laserů, které mají pevně danou spektrální čáru. Tyto lasery pracují na principu vytváření širokého spektra záření. Laditelné lasery jsou vhodné pro koncové ONT jednoty u WDM-PON sítí, kde je jejich univerzálnost výhodou, protože se nemusí vyrábět několik různých koncových ONT jednotek pro jednotlivé vlnové délky. To má výhodu i při správě a údržbě sítí, protože nám stačí jen jedna univerzální ONT jednotka jako záložní prvek.

4.4.2 Optické přijímače

Pro příjem optického signálu se používají fotodetektory. Jsou důležitou součástí optických přenosových tras a přeměňují optický signál na elektrický. V dnešní době se používají především fotodiody PIN a lavinové fotodiody APD.

PIN Fotodioda

Tento typ fotodiody se skládá ze tří oblastí. Z oblastí P a N, které jsou relativně tenké a z oblasti I, která je relativně tlustá. Dioda je konstruována tak, aby světlo dopadalo čelně na strukturu diody. Někdy se také využívá odrazu světla od zadní stěny diody. Tím se dá zvýšit citlivost [11].

Mezi její výhody patří široká absorpční oblast a malá kapacita přechodu. Díky tomu je využitelná pro vyšší přenosové rychlosti. Výroba PIN fotodiód je snadná, přesná a levná. Proto je jednou z nejvíce využívaných fotodiód.

Lavinová fotodioda APD

Lavinová fotodioda APD je konstrukčně stejná jako PIN fotodioda. Pracuje na stejném principu s rozdílem, že je na ni přivedeno velké napětí (100 až 200 V). Tím vzniká mnohem silnější elektrické pole v I vrstvě. Oproti PIN fotodiodám mají APD fotodiody větší citlivost a proto se využívají na trasách s vyššími přenosovými rychlostmi a tam kde je zapotřebí velké citlivosti fotodetektorů. Kvůli složitější výrobě, jsou dražší a také potřebují vyšší napájecí napětí.

4.4.3 Optické zesilovače

Optické zesilovače (a rovněž některé typy WDM filtrů) jsou aktivní zařízení určená pro zesílení či filtrování optických signálů a jako takové již nepatří do původního pojetí distribučních sítí ODN pasivních sítí [4]. Ale u PON sítí s prodlouženým dosahem se využívají zesilovače a regenerátory pro překlenutí delší vzdálenosti a vyššího útlumu. V současné době se využívají vláknové zesilovače EDFA, optické polovodičové zesilovače SOA a zesilovače na bázi Ramanova jevu.

Optické zesilovače se rozlišují podle způsobu použití a umístění v optické trase na tyto základní skupiny:

1. Výkonový zesilovač (Booster) – umístěn bezprostředně za optický vysílač, tím navyšuje výstupní výkon vysílače.
2. Mezilehlý zesilovač (In-line) – umístěn průběžně do optické trasy v místě, kde je potřeba zesílení úrovně optického signálu.
3. Předzesilovač – umísťuje se před přijímač, kde je potřeba zesílení optického signálu na minimální úroveň citlivosti daného fotodetektoru.
4. Kompenzátor – využívá se před vazebními optickými články nebo pasivními rozbočovači, představující vysokou hodnotu vložného útlumu v optické síti. Je umístěn tak, aby po průchodu optického signálu rozbočovačem byla na jeho výstupních větvích optimální úroveň optického signálu.

Optický vláknový EDFA zesilovač

Optický zesilovač EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) je skvělým řešením pro WDM systémy pro dosažení co největších vzdáleností. Tento optický zesilovač zesiluje všechny kanály WDM signálu najednou, kdy zesiluje přímo optický signál a tak jej nepřevádí na elektrický a zpět. Pro použití EDFA zesilovače v xWDM systémech musí být jeho zisk konstantní na celém spektru xWDM signálu a musí mít dostatečný zisk při nízkém šumovém čísle. Také u něho musí být zajištěna teplotní stabilita a spolehlivost.

EDFA zesilovač je tvořen ze dvou hlavních částí, z laserové pumpy a Erbiem dopovaného vlákna. Z laserové pumpy vyzařuje světlo, o vlnových délkách 980 nm nebo 1480 nm, do erbiového dopovaného vlákna, ve kterém dochází k excitaci atomů erbia do vyšších

energetických stavů. V dnešní době se využívají diody s výkonem 450 mW, takže při vlnové délce 980 nm je zesílení asi 10 dB/mW a u vlnové délky 1480 nm je zesílení okolo 5 dB/mW. Vzhledem ke vnitřnímu uspořádání zesilovače lze dosáhnout velkého rozsahu zesilovaného pásma. To umožňuje zesílit signál v C i L pásmu současně. Tyto zesilovače není možné využívat v pásmech O, E a S, protože zde dochází ke zkreslení signálu. Mezi nežádoucí účinky EDFA zesilovače patří šum, jehož hodnota je mezi 4 a 5 dB.

Optický polovodičový SOA zesilovač

Optický zesilovač SOA (Semiconductor Optical Amplifier) je podobný Fabry-Perot laserové diodě, kde místo koncových zrcadel je anti-reflexní vrstva, která zabraňuje vzniku rezonance generovaného záření a zvlnění výkonu v pracovním pásmu vlnových délek. Zisk tohoto zesilovače je na rozdíl od EDFA zesilovače či Ramanova zesilovače generován ve struktuře polovodiče, kdy můžeme úroveň signálu zvýšit až o 30 dB. SOA zesilovače pracují ve spektru 0,85 μm až 1,6 μm . Problémem SOA zesilovače je vyšší šum, nižší zisk a vysoká nelinearita s vysokým přechodovým časem.

Pro dosažení větších vzdáleností u WDM-PON sítí se používá RSOA (Reflective SOA), kdy je RSOA zesilovač umístěn přímo do ONU jednotky. Tato síť potom dokáže pracovat v širokém rozsahu vlnových délek. Jeho výhodou je nižší potřeba vstupní energie.

Ramanův zesilovač

Ramanův zesilovač je laserový zdroj připojený na optickou trasu, který vytváří stimulovaný Ramanův rozptyl SRS (Stimulated Raman Scattering) přímo v materiálu optického vlákna. Proto není potřeba vláken dopovaných vzácnými prvky jako u předchozích zesilovačů. Principem tohoto jevu je vzájemná interakce šířícího se světla v určitém prostředí. To vede ke vzniku frekvenčního posuvu. Laserový zdroj musí nabývat vysokého výkonu. Např. pro vlnové délky z oblasti 1500 -1600 nm je potřeba použít zdroj 1400 nm, kdy se používá polovodičová laserová dioda nebo Raman Fiber Laser. Na rozdíl od ostatních zesilovačů má schopnost zesilovat signál v celém rozsahu vlnových délek. Maximální zisk Ramanova zesilovače je až 30 dB.

| TYP | SOA | EDFA | Ramanův |
|---|---|---|---|
| Zisk [dB] | < 30 | > 50 | < 40 |
| Použitelné pásmo vlnových délek [nm] | 1280-1650 | 1525-1575 1560-1610 | 1280-1650 |
| Šířka pásma 3 dB [nm] | 60-70 | 30 | 10 |
| Šumové číslo [dB] | 5-8 | 4 | 4 |
| Zkreslení přeslechy | Ano (saturace) | Ne | Ne |
| Polarizační závislost | Ano, několik dB | Ne (<0,1 dB) | Ano |
| Účinnost | 28 dB/mA | 11 dB/mA | 0,08 dB/mW |
| Hlavní výhody | Nízká cena, široké pásmo vlnových délek | Vysoký zisk, necitlivost na polarizaci | Široké pásmo laditelnosti, vyšší zisk než SOA |
| Nevýhody | Výrazná závislost na polarizaci, nejnižší zisk, nelineární jevy (saturace) | Omezené pásmo vlnových délek, zesílení zpravidla jen pro diskretní vlnové délky | Vysoká cena, nízká účinnost čerpání, polarizační závislost, omezený frekvenční rozsah |

Tabulka 4.1: Porovnání jednotlivých zesilovačů

4.4.4 Pasivní optický rozbočovač (Splitter)

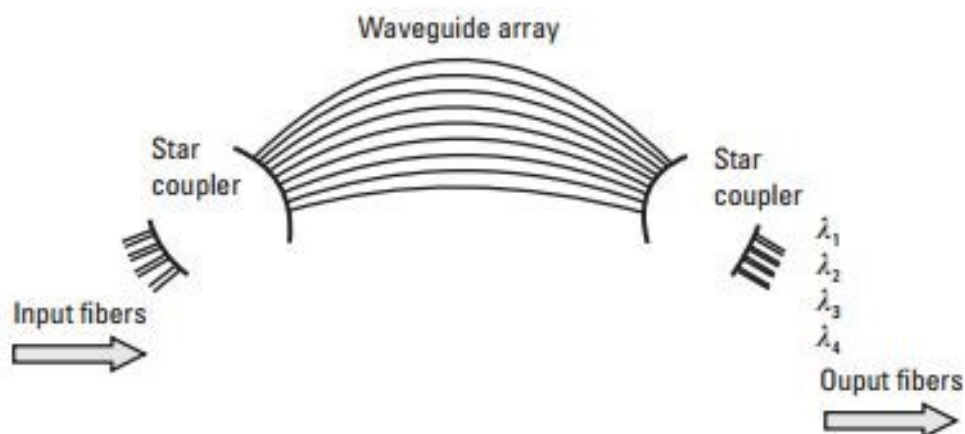
Pasivní optický splitter neboli rozbočovač je základním prvkem v pasivní optické síti. V sestupném směru provádí rozbočování optického signálu k jednotlivým koncovým jednotkám (ONU nebo ONT). Ve vzestupném směru sdružuje jednotlivé optické signály do společného vlákna ve směru k centrální jednotce OLT. Je to pasivní prvek optické sítě a tak nepotřebuje napájení. Použitím pasivních optických rozbočovačů na trase vede ke vzniku útlumu, který závisí na počtu výstupů u rozbočovače. Proto tento útlum roste s velikostí rozbočovacího poměru. Podle způsobu výroby máme fúzní rozbočovače (FBT – Fused Biconical Taper) a planární rozbočovače (PLC – Planar Lightwave Circuit).

Fúzní rozbočovače, někdy označované jako vláknové rozbočovače, vznikají starší výrobní metodou, kdy přiblížením dvou optických vláken dostatečně blízko k sobě, i včetně jader vláken je určitá část jednoho optického vlákna navázána do druhého vlákna, tak aby se dostala i do jejího jádra. Proto je jejich výroba založena na sváření dvou vláken při vysokých teplotách, ale nejprve se z vláken musí odstranit veškeré ochrany, aby došlo ke správnému zatavení vláken a spojení jader. Kvůli náročné výrobě se v praxi vyrábějí jen s menším rozbočovacím poměrem (1:2 nebo 1:4).

Planární rozbočovače jsou modernějším typem a vyrábí se na základě planární technologie, kdy se nejprve z křemenného skla SiO_2 nařezají jednotlivé destičky. Pomocí litografických metod jsou na nich vytvářeny masky s požadovanou strukturou. Potom jsou tyto destičky ponořeny do lázně s obsahem stříbra a sodíku, kde díky difúzi molekul stříbra a sodíku a tepla vzniká jádro vlnovodu, jehož pláštěm je samotný skleněný materiál. Nakonec se musí připojit vstupní a výstupní optická vlákna, kdy je potřeba vyrobit vstupní i výstupní vláknová pole. Tato pole jsou opět skleněné destičky, do kterých jsou vyřezány tzv. V-drážky. Do nich jsou vložena jádra optických vláken. Pro zajištění dostatečné ochrany je planární rozbočovač zataven do pevného pouzdra. Celý tento proces je náročný na přesnost, ale v dnešní době už to není problémem. S tímto rozbočovačem můžeme dosáhnout rozbočovacího poměru až 1:128.

4.4.5 AWG

Pasivní vlnová odbočnice AWG (Arrayed Waveguide Grating) je základním prvkem pro aplikace vlnového multiplexování v optických sítích. V jednom směru slouží pro pasivní vydělování jednotlivých vlnových délek. V opačném směru slouží pro jejich slučování. Princip vlnové odbočnice AWG máme zobrazeno na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: *Princip AWG [12].*

Optické signály jsou ze vstupní oblasti navázány do fázového pole AWG tak, aby vstupní signály měly vzhledem k sobě stejnou fázi. Fázové pole je tvořeno svazkem samostatných vlnovodů (kanálů) uspořádaných nejčastěji do soustředné kruhové či eliptické struktury tak, že mezi dvěma sousedními kanály je přesně definovaný rozdíl délky Δl [4]. V tomto poli také dochází ke vzájemnému fázovému posuvu mezi jednotlivými optickými signály, které se šíří různě posunutými dráhami. Na výstupu se nachází podobné pole jako na vstupu, ve kterém dochází ke vzájemné interferenci posunutých signálů z výstupu fázového pole. Jelikož výsledná

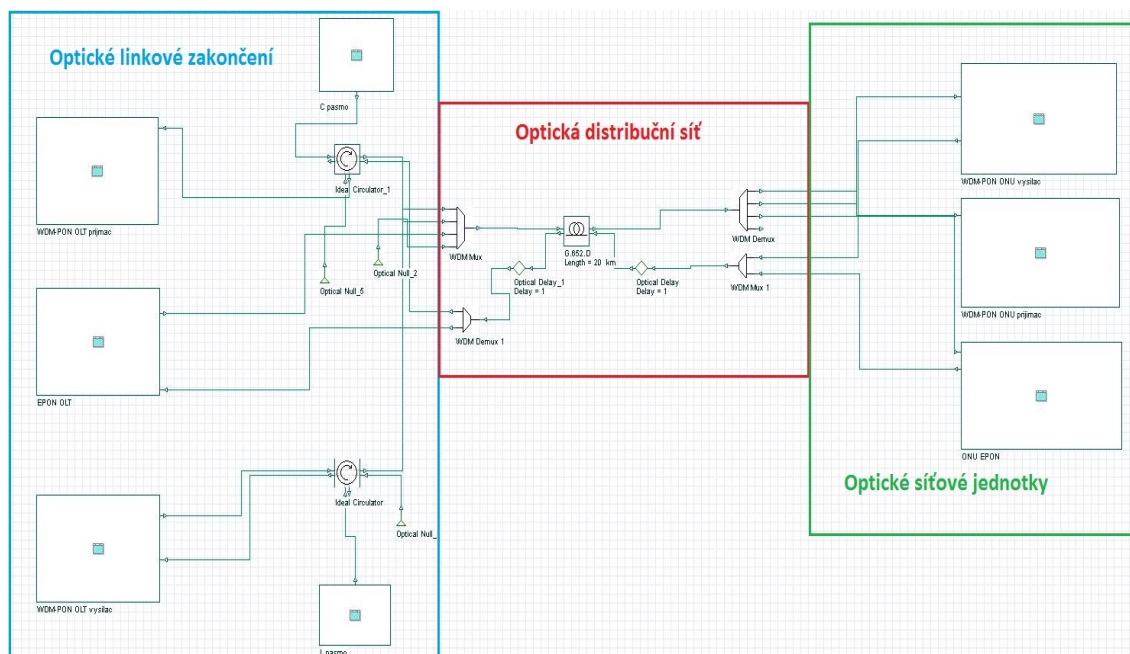
ekvifázová plocha z výstupu jednotlivých kanálků má pootočenou plochu o úhel úměrný změně vlnové délky, tak tyto výstupy musí být umístěné v interferenčních maximech jednotlivých vlnových délek. To má za následek oddělení jednotlivých vlnových délek ze vstupního signálu. AWG pracuje i v opačném směru, kdy jednotlivé vstupní vlnové délky jsou slučovány v jeden optický signál na výstupu do vlákna.

5 Simulace v programu OptiSystem

Tato kapitola se zabývá návrhem optické sítě v simulačním prostředí programu OptiSystem 13 od společnosti Optiwave System Inc. Tento program disponuje velkým množstvím komponent pro návrh optických tras a jeho výhodou jsou databáze, které jsou neustále rozšiřené o nově vznikající součástky.

5.1 Schéma sítě

V simulačním prostředí Optiwave OptiSystem 13 byla vytvořena optická síť na architektuře WDM-PON sítě, která se skládá ze tří částí. Z OLT jednotky na straně poskytovatele, ONU jednotky na straně uživatele a z ODN jednotky, která umožňuje komunikaci mezi těmito dvěma stranami. Schéma sítě máme zobrazeno na obrázku 5.1 a jednotlivé jednotky budou popsány níže.



Obrázek 5.1: Schéma širokopásmové FTTx přípojky na architektuře WDM-PON

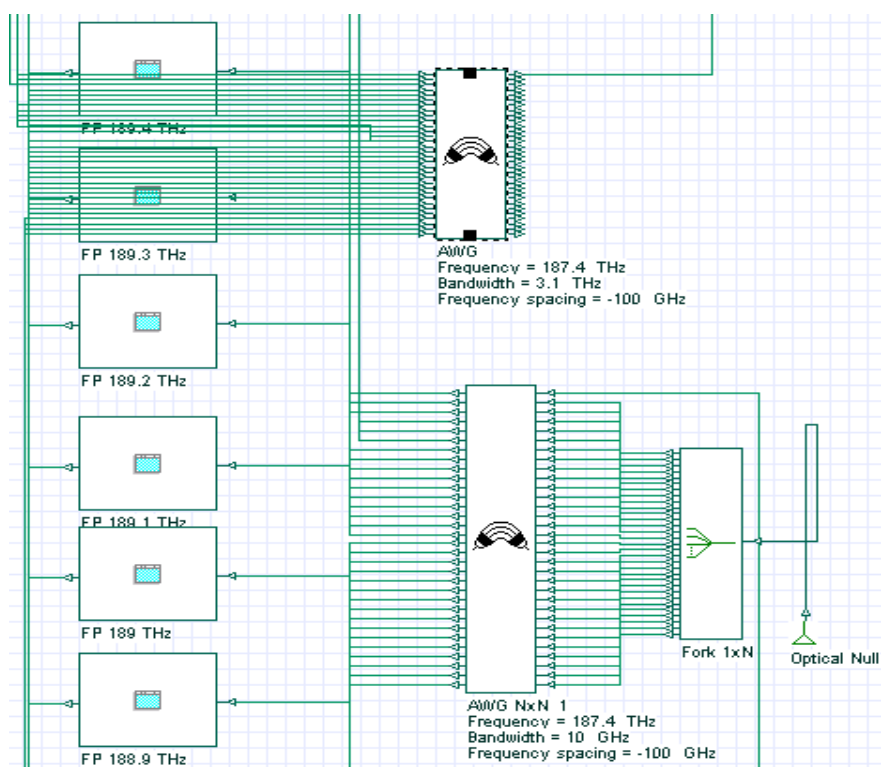
5.1.1 OLT jednotky

Na straně optického linkového zakončení se nachází tyto bloky:

- Vysílač WDM-PON,
- přijímač WDM-PON,
- C pásmo a L pásmo,
- OLT EPON.

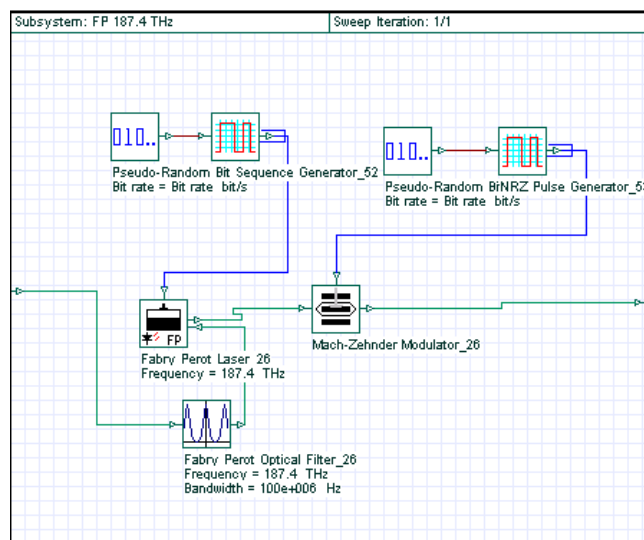
Vysílač OLT WDM-PON

Vysílač WDM-PON na straně OLT se skládá ze 32 Fabry-Perot laserů a dvou AWG filtrů. Fabry-Perot lasery přijímají signál z laserového pole, které vysílá v L pásmu s počáteční frekvencí 187,4 GHz a rozestupy signálů 100 GHz. První AWG filtr slouží pro demultiplexaci signálů do jednotlivých Fabry-Perot laserů. Druhý AWG filtr multiplexuje všechny kanály do jednoho optického svazku a je přiveden do optického cirkulátoru. Dále signál pokračuje do WDM multiplexoru a do optického vlákna. Na obrázku 5.2 je zobrazeno schéma WDM-PON vysílače.



Obrázek 5.2: Schéma vysílací části OLT jednotky WDM-PON

Vysílací jednotka s FP laserem je zobrazena na obrázku 5.3. Všechny vysílací jednotky jsou stejné. Liší se pouze s nastavenou frekvencí Fabry-Perot laserů. Dále se zde nachází Mach-Zehnder Modulátor a NRZ kódování s pseudonáhodným bitovým generátorem. Díky tomu je dosaženo vysílání dat.



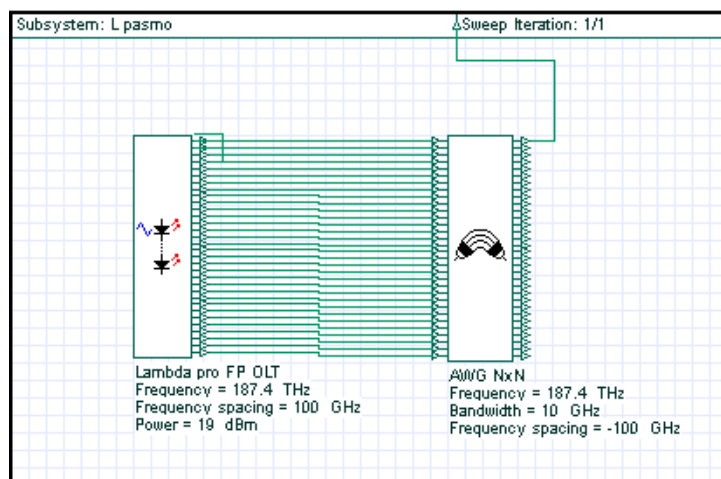
Obrázek 5.3: Schéma bloku jednoho Fabry-Perot laseru

Přijímač WDM-PON

Přijímač WDM-PON na straně OLT je stejný jako v ONU jednotce, které bude popsáno níže. Jediný rozdíl je, že přijímají vlnové délky z C pásma.

C pásmo a L pásmo

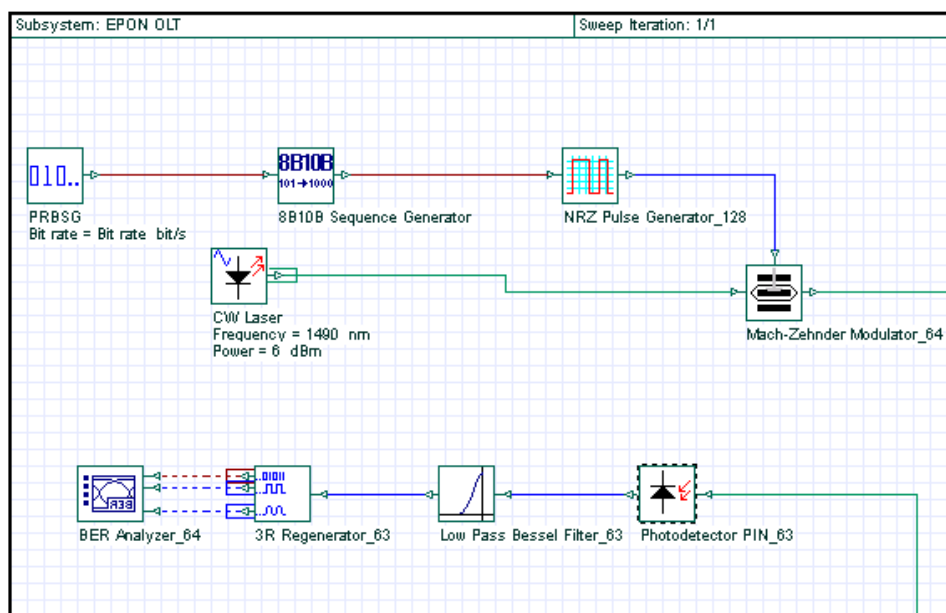
C a L pásmo slouží pro naladění Fabry-Perot laserů v OLT a v ONU jednotkách a jsou umístěné v OLT jednotce. Schéma L pásma je zobrazeno na obrázku 5.4. Skládá se z pole 32 laserů s počáteční frekvencí 187,4 THz. Rozstup mezi jednotlivými kanály je 100 GHz. Dále má nastaven výkon na 19 dBm. Pomocí AWG filtru jsou vlnové délky spojeny do jednoho svazku a následně přes optický cirkulátor vysílány do vysílací jednotky v OLT. Blok C pásmo se liší pouze v nastavení počáteční frekvence a výkonu. Signál se šíří přes druhý optický cirkulátor do WDM multiplexu a následně do optického vlákna a slouží pro naladění Fabry-Perot laserů v ONU jednotce.



Obrázek 5.4: Schéma bloku L pásma

OLT EPON

Optické linkové zakončení EPON sítě, které je zobrazeno na obrázku 5.5 se skládá z vysílací a přijímací části. Vysílací část se skládá z laseru, který je naladěný na vlnovou délku 1490 nm s výstupním výkonem 6 dBm. Následuje Mach-Zehnder modulátor, ke kterému je připojený NRZ generátor, bitový generátor a sekvenční generátor 8B/10B. Ten provádí kódování bitů podle 8B/10B. Přijímací část se skládá PIN fotodiody, dolní propusti, 3R generátoru a BER analyzátoru.



Obrázek 5.5: Schéma bloku OLT EPON

5.1.2 Optická distribuční síť ODN

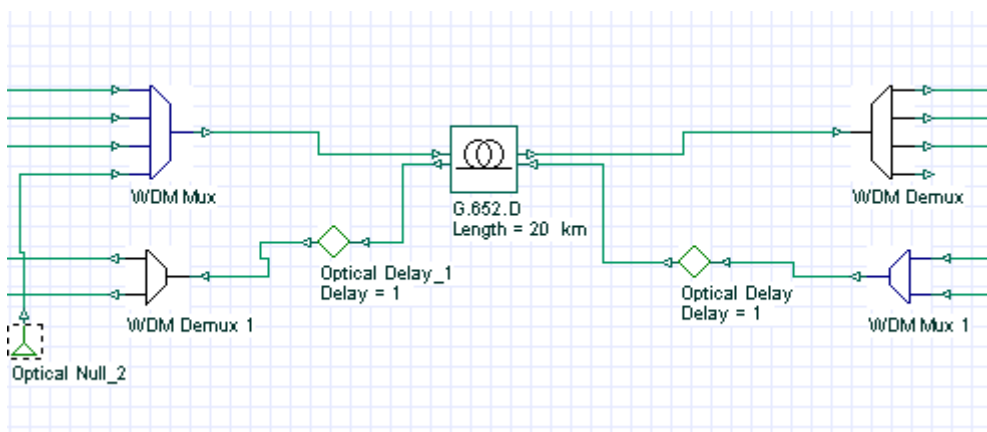
ODN jednotka, neboli optická distribuční síť je tvořena obousměrným vláknem a optickými rozbočovači, které jsou tvořeny WDM multiplexory a demultiplexory. První multiplexor slouží pro integraci vysílání z OLT jednotek do jednoho optického svazku pro jednovidové optické vlákno a demultiplexor slouží pro připojení k AWG filtru a optickému rozbočovači 1:4.

Jako optické vlákno bylo použito vlákno G.652.D a simulace byla provedena se třemi různými délkami, a to 5, 10 a 20 km. Nastavení vlákna můžete vidět v tabulce 5.1.

| | |
|----------------------|----------------|
| Vlnová délka | 1550 nm |
| Útlum | 0,24 dB/km |
| Chromatická disperze | 16,75 ps/nm/km |

Tabulka 5.1: Parametry optického vlákna

Jelikož bylo použito obousměrné optické vlákno, musí se pro zpětný směr použít optické zpoždění. Ty se používají jenom v simulacích, ve vzestupném směru. Jinak by nám optická komunikace po jednom kabelu fungovala pouze v sestupném směru a ve vzestupném by nám nic nenaměřila. V této topologii jsou použité dvě optická zpoždění, a proto je v nastavení simulace nastaven počet iterací na hodnotu 3 (počet optických zpoždění + 1). Jednotlivá optická zpoždění jsou nastavena na hodnotu 1. Schéma ODN jednotky je zobrazeno na obrázku 5.6.



Obrázek 5.6: Schéma ODN jednotky

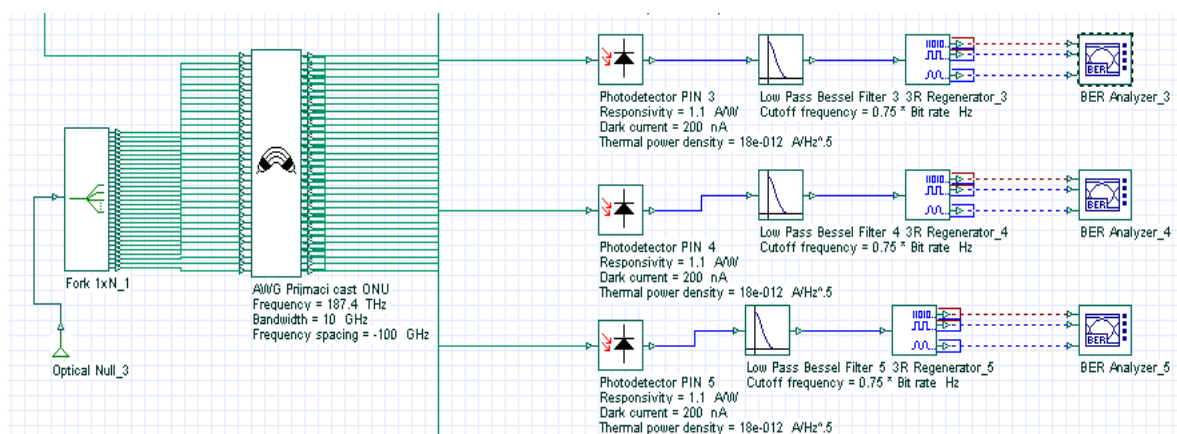
5.1.3 ONU jednotka

Na straně optického síťového zakončení se nachází tyto bloky:

- Přijímač WDM-PON,
- vysílač WDM-PON,
- ONU EPON.

Přijímač WDM-PON

Přijímač WDM-PON sítě, který je zobrazen na obrázku 5.7, přijímá vlnové délky z L pásma a skládá se z AWG filtru, který rozděluje optický signál na jednotlivé vlnové délky. Dále se zde nachází 32 přijímacích jednotek, které se skládají z PIN fotodiody, které přeměňují optický signál na elektrický. Dále se zde nachází dolní propust pro filtraci vysokofrekvenčního šumu a 3R generátor pro obnovu signálu. Následně je použit BER analyzátor pro zobrazení bitové chybovosti, R-faktoru a diagramu oka.



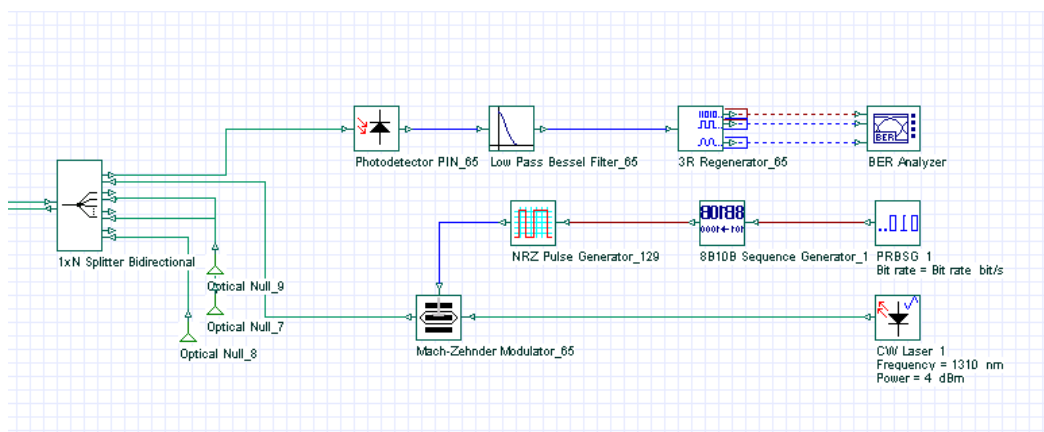
Obrázek 5.7: Schéma přijímače WDM-PON

Vysílač WDM-PON

Vysílač WDM-PON na straně optického síťového zakončení je stejný jako na straně optického linkového zakončení. Liší se akorát v tom, že pro naladění Fabry-Perot laserů se využívají vlnové délky z C pásma, které přicházejí z optického linkového zakončení.

ONU EPON

Optické síťové zakončení EPON sítě je totožné s optickým linkovým zakončením této sítě. Jediným rozdílem je nastavení laseru pro vysílání ve vzestupném směru. Má nastavenou frekvenci na 1310 nm a výkon 4 dBm. Dále se zde nachází optický rozbočovač 1:4. Schéma této jednotky je zobrazeno na obrázku 5.8.



Obrázek 5.8: Schéma bloku ONU EPON

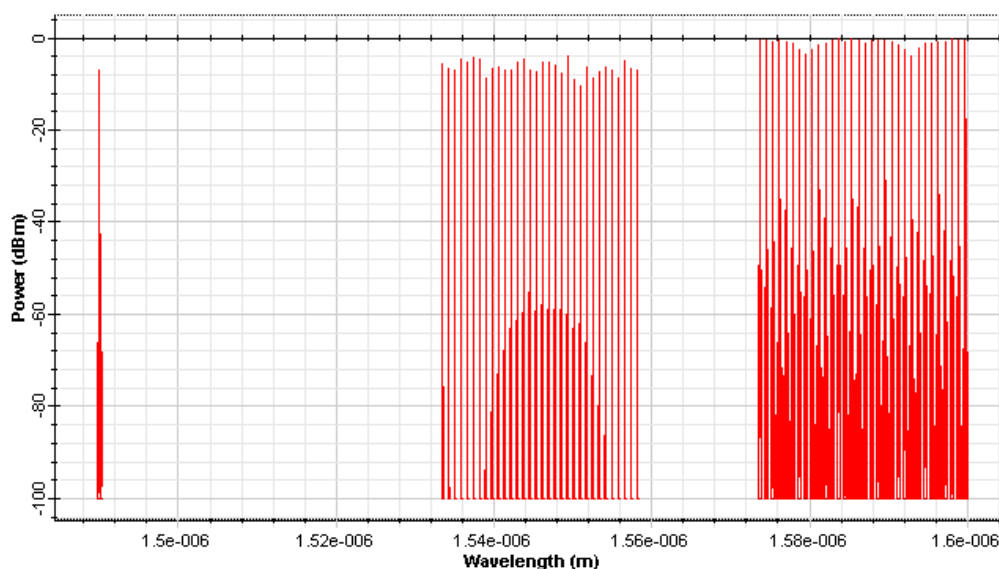
5.2 Výsledky simulace

Simulace probíhaly na třech různých délkách optického vlákna a to 5 km, 10 km a 20 km pro přenosovou rychlost 1 GBit/s. Při jednotlivých simulacích sledujeme bitovou chybovost, Q-faktor, diagram oka. Jako typ modulace signálu je použita modulace NRZ.

Na obrázku 5.9 můžete vidět spektrum na výstupu z WDM multiplexu, směr sestupný, který zpracoval všechny vstupní vlnové délky pro přenos po jednom vlákně. Je zde vidět jeden kanál s vlnovou délkou 1490 nm, který vysílá EPON OLT jednotka. 32 kanálů vysílaných v C pásmu s vlnovými délkami od 1533 nm do 1558 nm sloužící pro naladění Fabry-Perot laserů v ONU jednotce a 32 kanálů vysílaných v L pásmu s vlnovými délkami od 1574 nm do 1599 nm, které vysílá vysílací část WDM-PON jednotka na straně OLT.

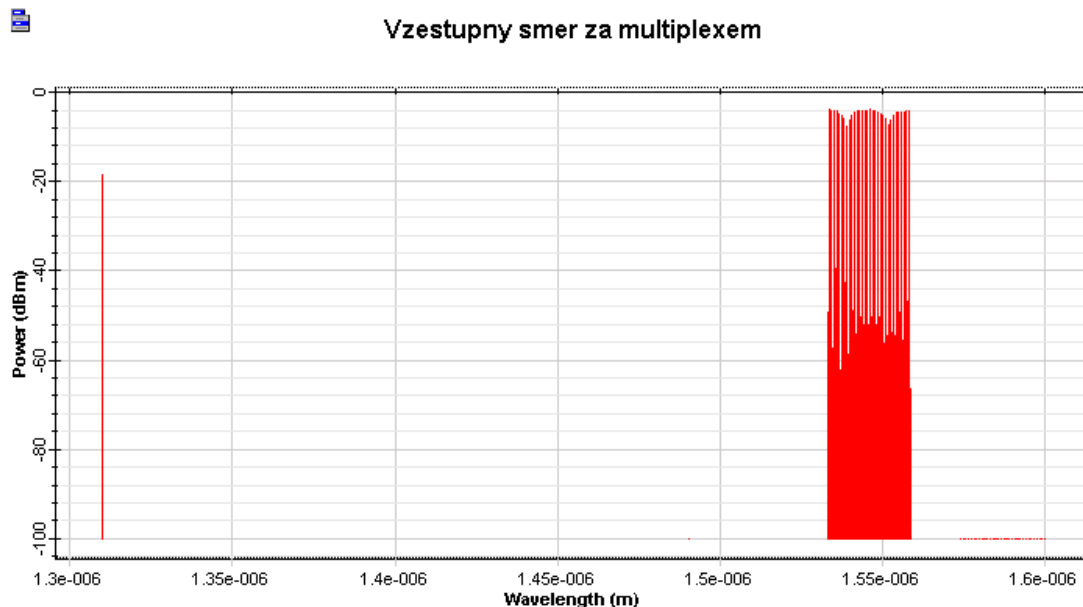


Sestupný smer za multiplexem



Obrázek 5.9: Spektrum vlnových délek za WDM multiplexem, směr sestupný

Na obrázku 5.10 je zobrazeno spektrum na výstupu z *WDM multiplexem*, směr vzestupný. Je zde vidět jeden kanál s vlnovou délkou 1310 nm, který vysílá ONU EPON jednotka a dále 32 kanálů s vlnovými délkami od 1533 nm do 1558 nm, které vysílá vysílací část WDM-PON jednotky na straně ONU.



Obrázek 5.10: *Spektrum vlnových délek za WDM multiplexem, směr vzestupný*

BER

Bitová chybovost (Bit Error Rate) vyjadřuje kvalitu digitálního přenosu. Je dána poměrem chybně přijatých bitů k celkovému počtu přijatých bitů během dané doby měření. Bitová chybovost bývá ovlivněna šumem, rušením, zkreslením signálu nebo i útlumem. Jedná se o bezrozměrnou veličinu.

Výpočet: $BER = bE/(vp*t)$
 bE – chybně přijaté bity,
 vp – přenosová rychlost,
 t – celková doba měření.

V tabulce 5.2 je zobrazena bitová chybovost pro část EPON síť v sestupném i vzestupném směru na měřených vzdálenostech. Můžete vidět, že s rostoucí vzdáleností nám bitová chybovost stoupá. V tabulce 5.3 je zobrazena bitová chybovost pro část WDM-PON síť v sestupném směru ve stejných vzdálenostech. V tabulce 5.4 je zaznamenána bitová chybovost ve vzestupném směru, která byla naměřena pouze u 9., 24., 25., a u 26 kanálu při vzdálenosti 20 km. U ostatních kanálů byla tato hodnota nulová.

Q-faktor

Q-faktor (Quality factor) je bezrozměrná veličina, která určuje kvalitu signálu. Čím vyšší je hodnota, tím vyšší je kvalita signálu. Q-faktor zahrnuje všechna fyzikální zhoršení (šумы, disperze, nelineární jevy), které mají vliv na kvalitu signálu a způsobují bitovou chybovost.

Výpočet: $Q = (I_1 - I_0) / (\sigma_1 - \sigma_0)$

I_1 – logická úroveň „1“,

I_0 – logická úroveň „0“,

σ_1 – standartní odchylka logické úrovně „1“,

σ_0 – standartní odchylka logické úrovně „0“.

V následujících dvou tabulkách jsou zobrazeny naměřené hodnoty Q-faktoru pro dané vzdálenosti. V tabulce 5.2 pro EPON jednotky a v tabulce 5.3 pro WDM-PON v sestupném směru a v tabulce 5.4 ve vzestupném směru. Můžete si všimnout, že s rostoucí vzdáleností nám kvalita signálu klesá, ale i přes to je kvalita signálu stále hodně vysoká.

| | 5 km | | 10 km | | 20 km | |
|----------------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| | BER | Q-faktor | Ber | Q-faktor | BER | Q-faktor |
| Sestupný směr | 0 | 69,9583 | 0 | 48,2857 | 6,48083E-124 | 23,646 |
| Vzestupný směr | 5,84704E-300 | 36,9994 | 9,49282E-160 | 26,9051 | 8,39275E-67 | 17,2263 |

Tabulka 5.2: Q-faktor a bitová chybovost EPON sítě ve vzdálenostech 5, 10 a 20 km

| Sestupný směr | 5 km | | 10 km | | 20 km | |
|---------------|------|----------|-------|----------|-------|----------|
| | BER | Q-faktor | BER | Q-faktor | Ber | Q-faktor |
| 1. kanál | 0 | 253,329 | 0 | 229,773 | 0 | 134,204 |
| 2. kanál | 0 | 123,498 | 0 | 226,197 | 0 | 134,59 |
| 3. kanál | 0 | 286,487 | 0 | 220,457 | 0 | 152,513 |
| 4. kanál | 0 | 291,11 | 0 | 194,485 | 0 | 128,343 |
| 5. kanál | 0 | 233,442 | 0 | 242,566 | 0 | 151,276 |
| 6. kanál | 0 | 293,791 | 0 | 206,872 | 0 | 128,946 |
| 7. kanál | 0 | 204,845 | 0 | 155,142 | 0 | 111,487 |
| 8. kanál | 0 | 190,27 | 0 | 113,725 | 0 | 75,666 |

| | | | | | | |
|-----------|---|---------|---|---------|---|---------|
| 9. kanál | 0 | 120,272 | 0 | 98,5789 | 0 | 69,04 |
| 10. kanál | 0 | 145,734 | 0 | 168,496 | 0 | 94,7094 |
| 11. kanál | 0 | 142,669 | 0 | 145,314 | 0 | 117,716 |
| 12. kanál | 0 | 142,564 | 0 | 159,41 | 0 | 111,098 |
| 13. kanál | 0 | 158,676 | 0 | 224,224 | 0 | 135,669 |
| 14. kanál | 0 | 301,885 | 0 | 212,824 | 0 | 145,174 |
| 15. kanál | 0 | 215,886 | 0 | 149,682 | 0 | 128,018 |
| 16. kanál | 0 | 287,616 | 0 | 230,531 | 0 | 128,486 |
| 17. kanál | 0 | 330,035 | 0 | 237,173 | 0 | 144,45 |
| 18. kanál | 0 | 322,985 | 0 | 121,803 | 0 | 56,3829 |
| 19. kanál | 0 | 212,215 | 0 | 116,441 | 0 | 141,693 |
| 20. kanál | 0 | 200,303 | 0 | 122,988 | 0 | 139,041 |
| 21. kanál | 0 | 320,431 | 0 | 236,124 | 0 | 137,204 |
| 22. kanál | 0 | 213,376 | 0 | 214,918 | 0 | 150,324 |
| 23. kanál | 0 | 249,834 | 0 | 178,584 | 0 | 117,007 |
| 24. kanál | 0 | 216,341 | 0 | 166,026 | 0 | 85,4236 |
| 25. kanál | 0 | 135,537 | 0 | 114,045 | 0 | 64,5358 |
| 26. kanál | 0 | 197,831 | 0 | 149,04 | 0 | 91,2948 |
| 27. kanál | 0 | 276,28 | 0 | 176,016 | 0 | 112,551 |
| 28. kanál | 0 | 188,462 | 0 | 178,187 | 0 | 109,94 |
| 29. kanál | 0 | 210,759 | 0 | 240,741 | 0 | 140,636 |
| 30. kanál | 0 | 280,287 | 0 | 227,838 | 0 | 122,724 |
| 31. kanál | 0 | 225,98 | 0 | 77,801 | 0 | 147,037 |
| 32. kanál | 0 | 131,629 | 0 | 261,094 | 0 | 154,925 |

Tabulka 5.3: *Q-faktor a bitová chybovost pro kanály WDM-PON, směr sestupný*

| Vzestupný směr | 5 km | | 10 km | | 20 km | |
|-------------------|------|----------|-------|----------|-------|----------|
| | BER | Q-faktor | BER | Q-faktor | Ber | Q-faktor |
| 1. kanál | 0 | 139,971 | 0 | 102,022 | 0 | 61,3914 |
| 2. kanál | 0 | 145,166 | 0 | 110,883 | 0 | 58,5266 |
| 3. kanál | 0 | 151,284 | 0 | 100,884 | 0 | 62,14 |

| | | | | | | |
|-----------|---|---------|---|---------|--------------|---------|
| 4. kanál | 0 | 134,353 | 0 | 109,533 | 0 | 63,5458 |
| 5. kanál | 0 | 141,545 | 0 | 99,9849 | 0 | 54,4149 |
| 6. kanál | 0 | 126,41 | 0 | 101,655 | 0 | 61,6904 |
| 7. kanál | 0 | 110,782 | 0 | 89,005 | 0 | 50,3564 |
| 8. kanál | 0 | 93,7861 | 0 | 72,094 | 0 | 39,6445 |
| 9. kanál | 0 | 60,9339 | 0 | 56,508 | 8,35662E-165 | 27,334 |
| 10. kanál | 0 | 104,131 | 0 | 70,9847 | 0 | 41,2532 |
| 11. kanál | 0 | 128,072 | 0 | 99,442 | 0 | 49,7611 |
| 12. kanál | 0 | 144,111 | 0 | 99,421 | 0 | 49,8075 |
| 13. kanál | 0 | 146,781 | 0 | 108,498 | 0 | 56,9659 |
| 14. kanál | 0 | 140,792 | 0 | 100,911 | 0 | 58,2387 |
| 15. kanál | 0 | 159,81 | 0 | 115,466 | 0 | 64,3443 |
| 16. kanál | 0 | 151,403 | 0 | 105,708 | 0 | 57,1134 |
| 17. kanál | 0 | 168,013 | 0 | 112,295 | 0 | 54,7599 |
| 18. kanál | 0 | 144,348 | 0 | 116,042 | 0 | 61,956 |
| 19. kanál | 0 | 150,289 | 0 | 109,803 | 0 | 56,1849 |
| 20. kanál | 0 | 142,933 | 0 | 114,789 | 0 | 60,1344 |
| 21. kanál | 0 | 134,945 | 0 | 97,538 | 0 | 56,0936 |
| 22. kanál | 0 | 121,48 | 0 | 98,466 | 0 | 56,352 |
| 23. kanál | 0 | 117,477 | 0 | 82,591 | 0 | 43,5732 |
| 24. kanál | 0 | 104,408 | 0 | 60,197 | 2,70884E-299 | 36,958 |
| 25. kanál | 0 | 63,8542 | 0 | 42,69 | 6,46519E-190 | 29,3709 |
| 26. kanál | 0 | 82,74 | 0 | 66,7305 | 1,01961e-311 | 37,7235 |
| 27. kanál | 0 | 100,266 | 0 | 88,299 | 0 | 43,4992 |
| 28. kanál | 0 | 113,494 | 0 | 94,715 | 0 | 47,5133 |
| 29. kanál | 0 | 105,837 | 0 | 84,88 | 0 | 54,8511 |
| 30. kanál | 0 | 139,736 | 0 | 112,297 | 0 | 57,7337 |
| 31. kanál | 0 | 157,067 | 0 | 92,266 | 0 | 55,1719 |
| 32. kanál | 0 | 129,607 | 0 | 85,0811 | 0 | 57,1754 |

Tabulka 5.4: *Q-faktor a bitová chybovost pro kanály WDM-PON, směr vzestupný*

Výkonová a útlumová bilance

V následujících tabulkách jsou zaznamenány naměřené hodnoty výkonové úrovně optického signálu, které byly změřeny pomocí Power Meteru v různých bodech navrhované sítě. V tabulce 5.5 jsou zaznamenány výkonové a útlumové bilance mezi jednotlivými úseky v sestupném směru s délkou optického vlákna 5 km. A to za výstupem z L a C pásma, WDM-PON OLT vysílače, EPON OLT vysílače. Dále za výstupem z WDM multiplexu, optického vlákna, WDM demultiplexu a na vstupu do ONU jednotek WDM-PON přijímače a ONU EPON jednotky. Na výstupu z multiplexu a demultiplexu byly zaznamenány tři úrovně signálu dané pro vysílané C a L pásma, kdy vysílač na straně OLT vysílá v L pásmu a C pásmo slouží pro naladění vysílačů v ONU jednotce. Třetí úroveň signálu je daná pro vlnovou délku 1490 nm, která je vysílána z EPON vysílače na straně OLT. U WDM-PON jsou na konci trasy zaznamenány výsledky pro 1 kanál. V tabulce 5.6 jsou zaznamenány hodnoty pro vzestupný směr také ve vzdálenosti 5 km.

| Místo měření | | Úroveň signálu [dBm] | Útlumová bilance [dBm] |
|---|---------|----------------------|------------------------|
| Výstup z L pásma | | 29,047 | - |
| Výstup z C pásma | | 15,048 | - |
| Výstup z WDM-PON OLT vysílače (L pásmo) | | 19,793 | -9,254 |
| Výstup z EPON OLT (1490 nm) | | 3,123 | - |
| Výstup z WDM mux | L pásmo | 18,12 | -1,673 |
| | C pásmo | 18,12 | +3,072 |
| | 1490 nm | 18,12 | +14,997 |
| Výstup za vláknem | | 16,918 | -1,202 |
| Výstup z WDM demux | L pásmo | 12,918 | -4 |
| | C pásmo | 7,848 | -9,07 |
| | 1490 nm | -4,076 | -20,994 |
| Vstup do WDM-PON ONU přijímač | | -6,814 | -19,732 |
| Vstup do ONU EPON | | -16,164 | -12 |

Tabulka 5.5: Výkonová a útlumová bilance s délkou optického vlákna 5 km, směr sestupný

| Místo měření | | Úroveň signálu [dBm] | Útlumová bilance [dBm] |
|---|---------|----------------------|------------------------|
| Výstup z WDM-PON ONU vysílače (C pásmo) | | 16,181 | - |
| Výstup z ONU EPON (1310 nm) | | -10,768 | - |
| Výstup z WDM mux | C pásmo | 13,19 | -2,991 |
| | 1310 nm | 13,19 | +23,958 |
| Výstup za vláknem | | 11,988 | -1,202 |
| Výstup z WDM demux | C pásmo | 8,981 | -3,007 |
| | 1310 nm | -17,968 | -29,956 |
| Vstup WDM-PON OLT přijímač | | -10,551 | -19,532 |
| Vstup EPON OLT | | -17,968 | - |

Tabulka 5.6: Výkonová a útlumová bilance s délkou optického vlákna 5 km, směr vzestupný

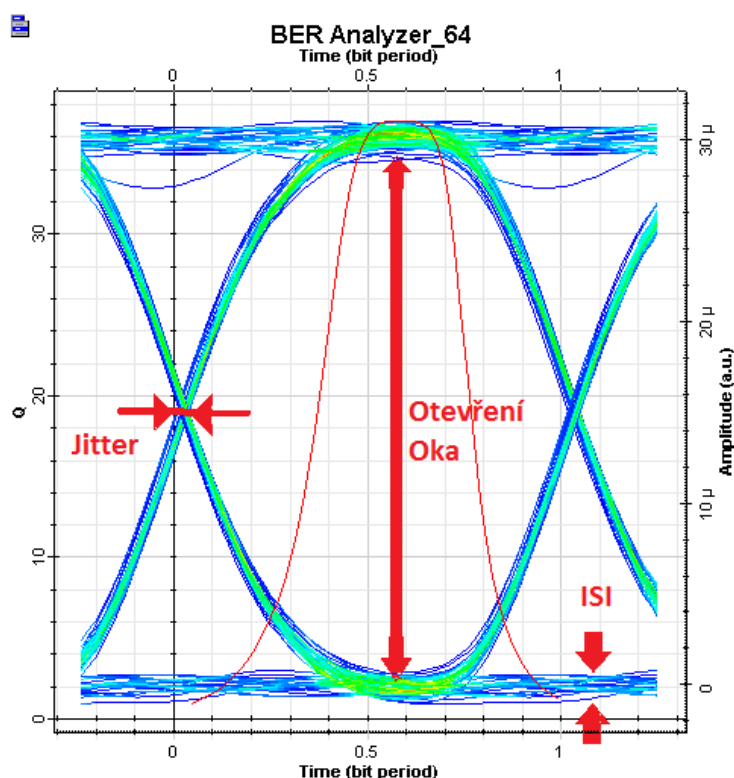
V následující tabulce 5.7 jsou zobrazené celkové útlumy na trase pro vzdálenosti 5, 10 a 20 km. S rostoucí vzdáleností roste i celkový útlum na trase. To je způsobeno útlumem optického vlákna 0,24 dBm/km.

| Celkový útlum na trase [dBm] | | | | | | |
|------------------------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| | 5 km | | 10 km | | 20 km | |
| | Sestupný směr | Vzestupný směr | Sestupný směr | Vzestupný směr | Sestupný směr | Vzestupný směr |
| WDM-PON | 26,607 | 26,732 | 27,904 | 27,941 | 30,207 | 30,353 |
| EPON | 19,287 | 7,2 | 20,546 | 8,4 | 22,82 | 10,801 |

Tabulka 5.7: Celkový útlum na trase

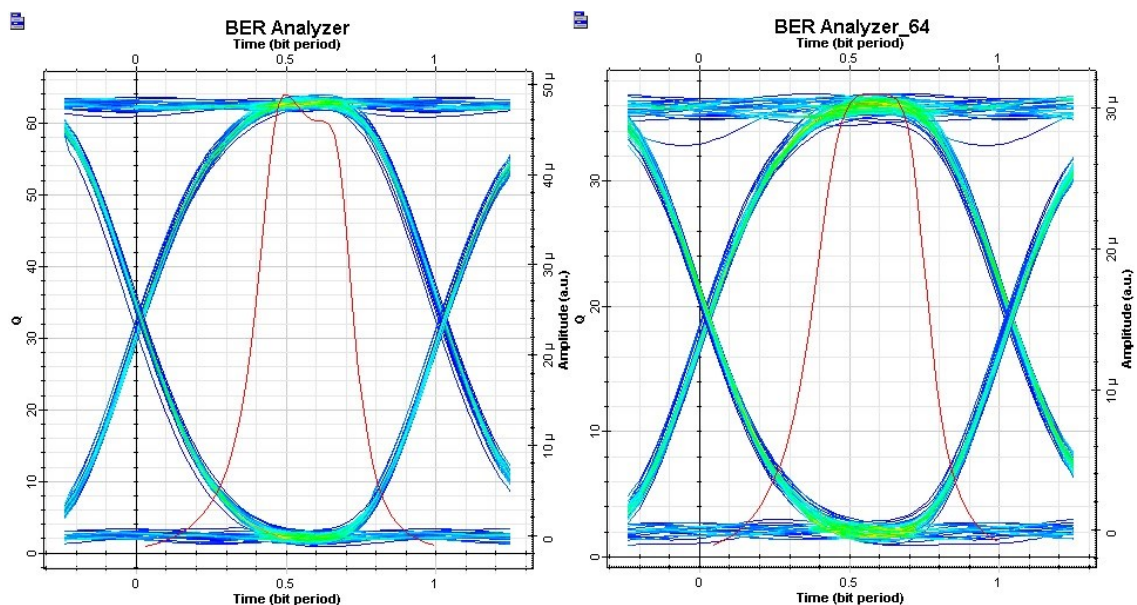
Diagram oka

Diagram oka se používá v telekomunikačních systémech pro analýzu digitálního přenosu a je vytvořen prvkem BER analyzátořem, který je připojen na 3R generátor. Z diagramu oka je možné zjistit parametr ISI (InterSymbol Interference – mezisymbolové interference), který způsobuje překrývání jednotlivých modulačních impulsů. Dále jde zjistit hodnotu jitteru. To je hodnota kolísání zpoždění jednotlivých bitů. Na obrázku 5.11 jsou tyto parametry zobrazeny na diagramu oka. Čím více je oko otevřené, kvalita přijatého signálu je vyšší a tím pádem je menší útlum či rušení přijatého signálu.

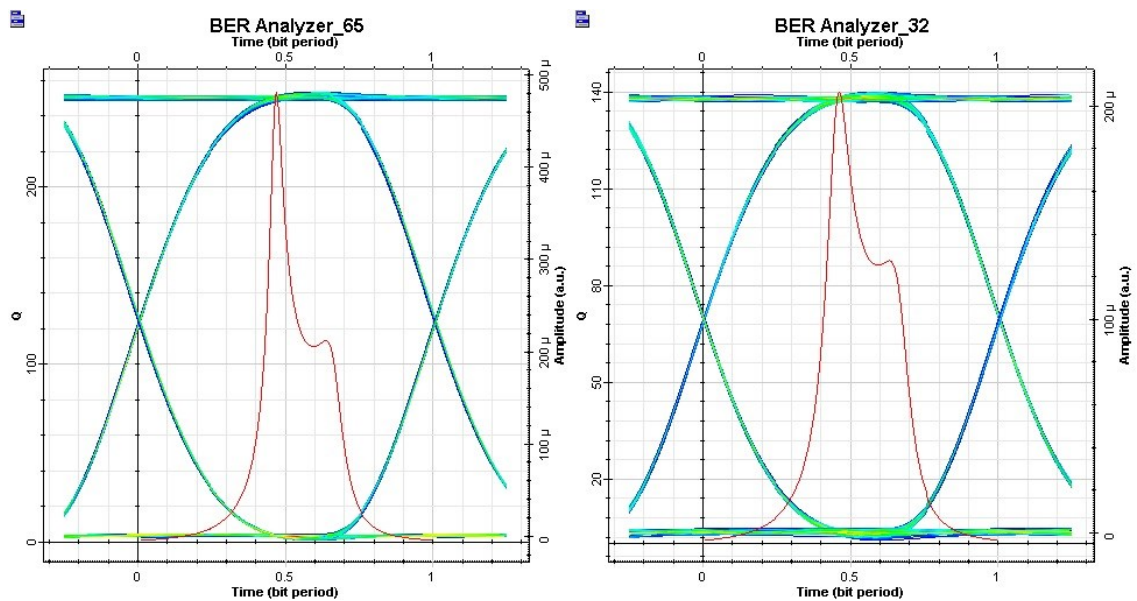


Obrázek 5.11: Diagram oka s vyznačenými parametry

Na následujících dvou obrázcích jsou výsledné diagramy oka pro vzdálenost 5 km, kdy na obrázku 5.12 je zobrazen sestupný a vzestupný směr pro jednotky EPON a na obrázku 5.13 pro 1 kanál jednotky WDM-PON. Můžete vidět, že kvalita signálu je lepší u jednotek WDM-PON, u kterých je taky maximální otevřenost oka a mají nulovou bitovou chybovost. U EPON jednotek na této vzdálenosti je kvalita signálů také vysoká, ale byla u nich naměřená bitová chybovost ve vzestupném směru.



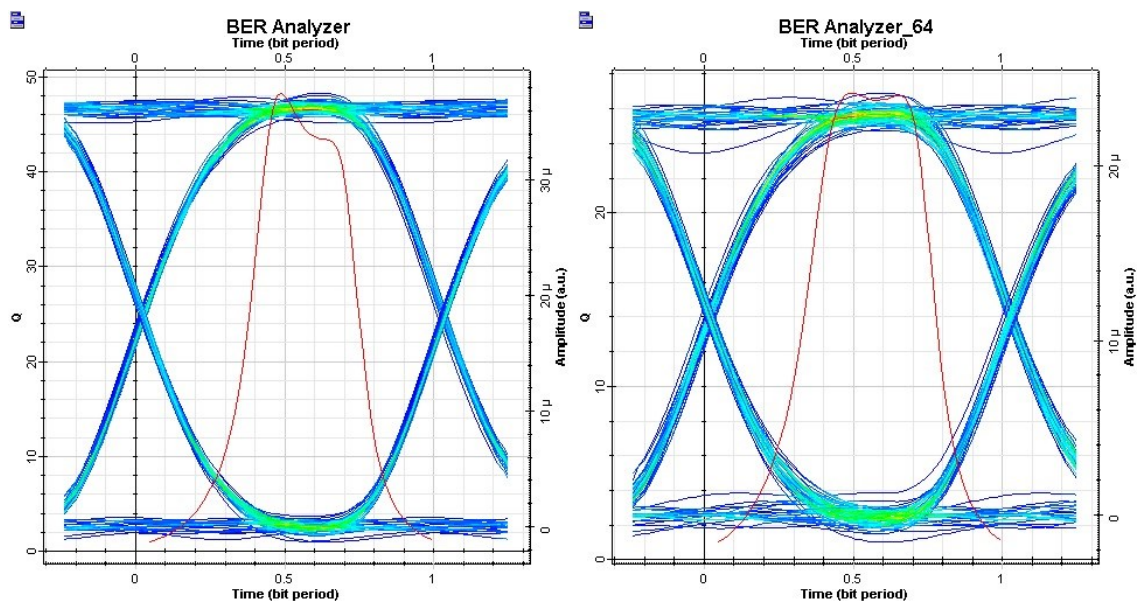
Obrázek 5.12: Diagram oka pro sestupný a vzestupný směr jednotek EPON ve vzdálenosti 5 km



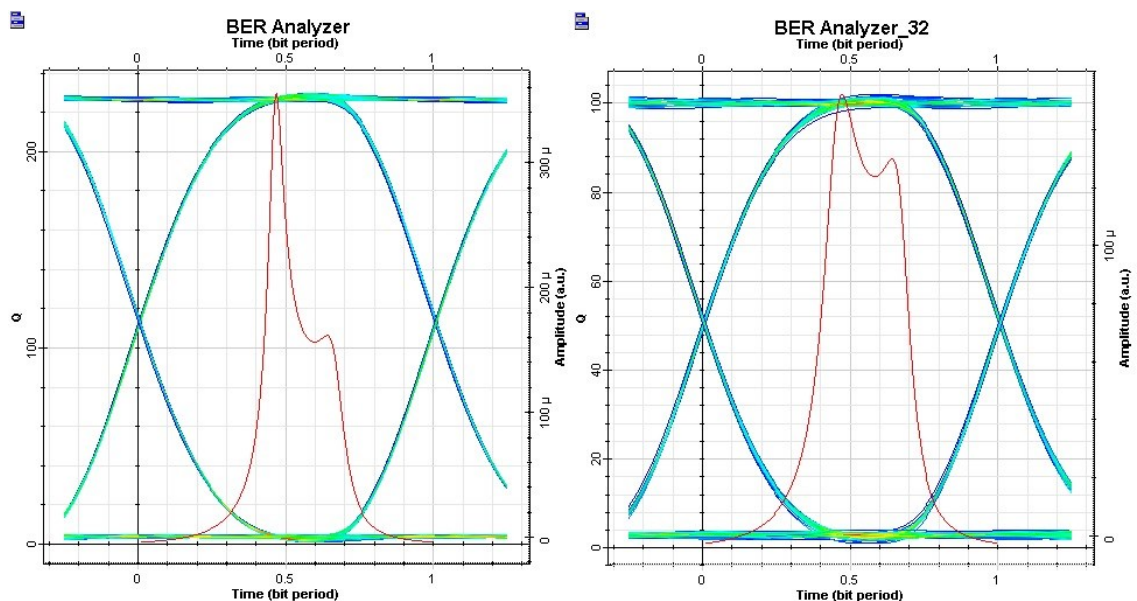
Obrázek 5.13: Diagram oka pro sestupný a vzestupný směr jednotek WDM-PON ve vzdálenosti 5 km

Na obrázcích 5.14 a 5.15 jsou zobrazeny diagramy oka pro vzdálenost 10 km. Na prvním obrázku jsou zobrazeny pro EPON jednotky v sestupném i vzestupném směru a na druhém obrázku pro WDM-PON jednotky v sestupném a vzestupném směru. Oproti měření na 5 km

si můžete všimnout, že na 10 km nám klesla kvalita signálu. V důsledku toho, nám stoupla bitová chybovost u EPON jednotek. WDM-PON jednotek byla bitová chybovost stále nulová.



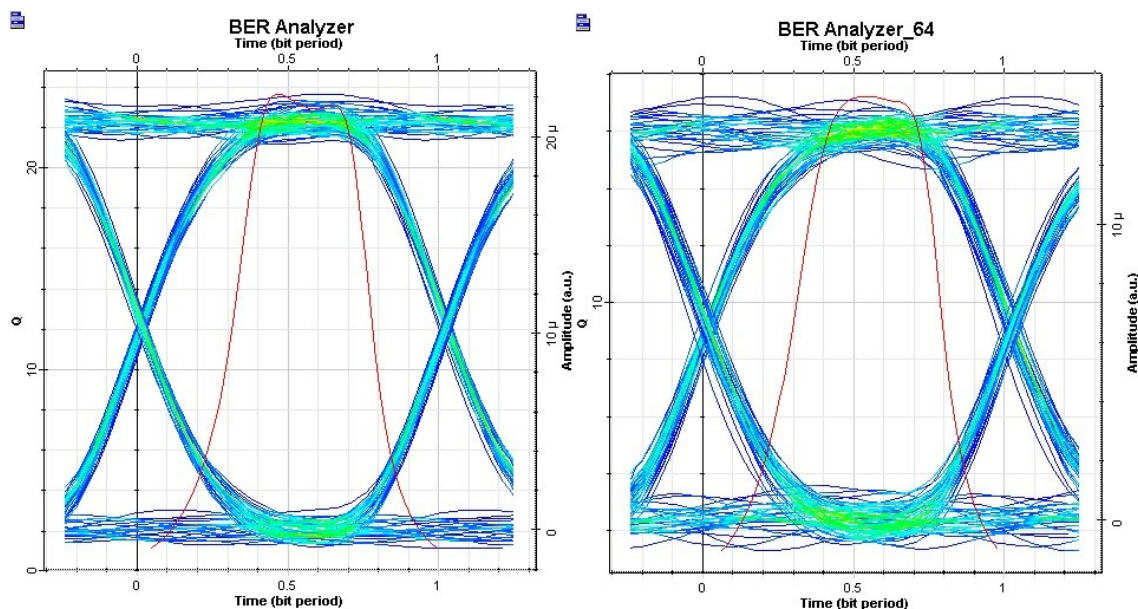
Obrázek 5.14: Diagram oka pro sestupný a vzestupný směr jednotek EPON ve vzdálenosti 10 km



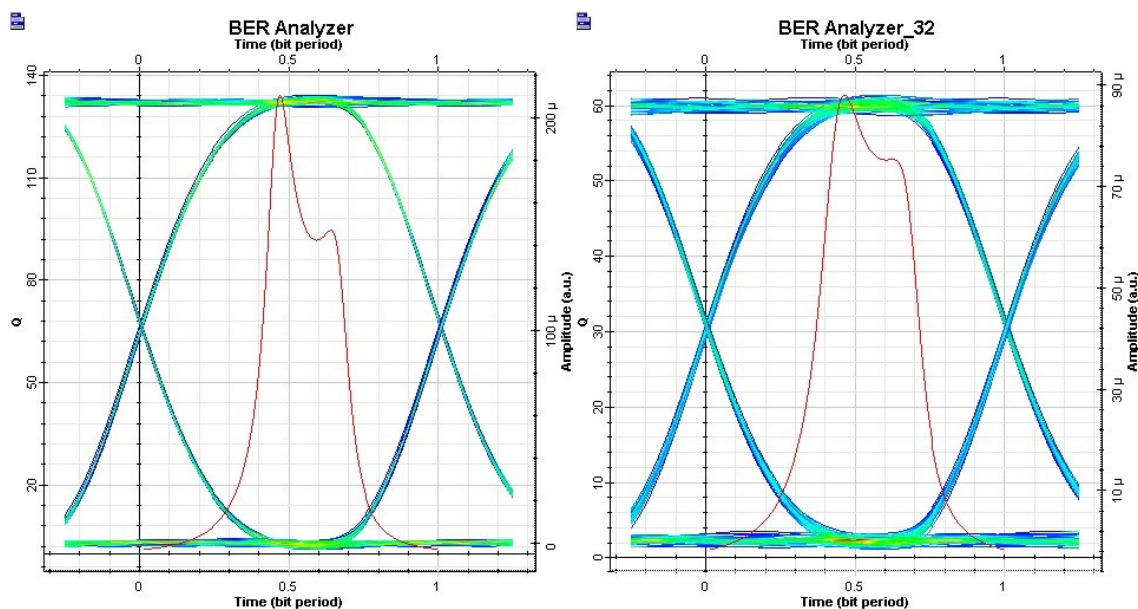
Obrázek 5.15: Diagram oka pro sestupný a vzestupný směr jednotek WDM-PON ve vzdálenosti 10 km

Na obrázcích 5.16 a 5.17 jsou zobrazeny diagramy oka pro vzdálenost 20 km. Na prvním obrázku jsou zobrazeny pro EPON jednotky v sestupném i vzestupném směru a na druhém obrázku pro WDM-PON jednotky v sestupném a vzestupném směru. Oproti předchozímu měření

si můžete všimnout, že na vzdálenosti 20 km nám výrazněji klesla kvalita signálu. V důsledku toho, nám stoupla bitová chybovost u EPON jednotek. Taký si můžete všimnout, že se u těchto jednotek zmenšilo otevření oka. U WDM-PON jednotek byla naměřená bitová chybovost pouze u některých kanálů ve vzestupném směru.



Obrázek 5.16: Diagram oka pro sestupný a vzestupný směr jednotek EPON ve vzdálenosti 20 km



Obrázek 5.17: Diagram oka pro sestupný a vzestupný směr jednotek WDM-PON ve vzdálenosti 20 km

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo popsat WDM-PON technologii a FTTx a následně navrhnout síť širokopásové FTTx přípojky na architektuře WDM-PON sítě. Návrh sítě byl proveden v simulačním prostředí Optiwave OptiSystem 13, který je zaměřen na simulaci optických sítí.

První část této práce se zabývala teoretickým rozbořem. Byla rozdělena do čtyř kapitol. V první kapitole byly popsány vlastnosti optických vláken. Dále zde byly popsány útlumy a disperze optických vláken. V další kapitole byla probírána problematika optických přístupových sítí, jako je jejich struktura, vlastnosti a hlavně zde byla popsána FTTx technologie. Třetí kapitola se zabývala pasivní optickou sítí. Kromě popisu PON zde byly popsány i topologie sítí a dále standardy pasivních optických sítí. Čtvrtá kapitola se věnovala standardu WDM-PON. Byly zde popsány technologie CWDM, DWDM, WWDM a dále aktivní a pasivní prvky WDM-PON sítě.

V praktické části byla vytvořena širokopásmová FTTx přípojka na architektuře WDM-PON v simulačním prostředí Optiwave OptiSystem 13. Zapojení bylo navrženo pro 32 koncových jednotek u WDM-PON sítě a pro 1 jednotku u EPON sítě. Nastavení jednotlivých částí bylo celkem složité a musely se řešit i problémy s funkčností simulace. Pro správnou funkčnost simulace bylo zapotřebí použít i prvky, které se v reálném zapojení nepoužívají. Například pro obousměrný provoz na jednom optickém vlákne musely být použity optické zpožďovače ve vzestupném směru. Kvůli velké náročnosti simulace byla nastavena přenosová rychlost na 1 GB/s pro obě sítě, kdy u EPON sítě bylo dosaženo přenosové rychlosti 1,25 GB/s pomocí 8B/10B kódování. Simulace byly prováděny ve vzdálenostech 5, 10 a 20 km a byly měřeny hodnoty: bitová chybovost, Q-faktor, výkonová a útlumová bilance a také zobrazení diagramu oka. Jednotlivé výsledky byly zaznamenány v tabulkách. Diagramy oka byly zaznamenány pro první kanály. U optických spekter jednotlivých sítí nedocházelo k problémům. Pomocí správného nastavení multiplexorů a demultiplexorů nedocházelo k vzájemnému rušení. Při zvyšování délky optického vlákna docházelo k narůstání bitové chybovosti a kvalita signálu klesala. To bylo zřetelně vidět u EPON jednotek.

Vliv na maximální dosah této sítě měla EPON síť, která má dosah sítě 20 km. WDM-PON síť umožňuje dosah přes 100 km bez použití optických zesilovačů. Pro větší dosah sítě by se musel zvýšit výkon u EPON sítě, nebo by se musely snížit přenosové rychlosti.

Tato bakalářská práce by mohla sloužit jako pomůcka při vytváření širokopásmové FTTx přípojky na architektuře WDM-PON sítě přímo v laboratoři, kdy je možnost současně provozovat více druhů pasivních sítí po jednom optickém vlákne.

Použitá literatura

- [1] KAZOVSKY, Leonid G. *Broadband Optical Access Networks*. Canada: Wiley, 2011. 283 s. ISBN 978-0-470-18235-2
- [2] LAM, Cedric. *Passive Optical Networks: Principles and practice*. Oxford: Elsevier Onc., 2007. 324 s. ISBN 978-0-12-373853-0
- [3] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno: Miloslav Filka, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1
- [4] LAFATA, Pavel a VODRÁŽKA, Jiří. *Optické přístupové sítě a přípojky FTTx*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2014. 294 s. ISBN 978-80-01-05463-5
- [5] VODRÁŽKA, Jiří. *Přenosové systémy v přístupové síti*. Skripta ČVUT, Praha 2006. 196 s.
- [6] LAFATA, Pavel a VODRÁŽKA, Jiří. *Rozvoj přípojek FTTx* [online]. 2010 [cit. 2014-10-27]. Dostupné z: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:cVIIgzzPl90J:www.elektrorevue.cz/cz/download/rozvoj-pripojek-fttx/+&cd=4&hl=cs&ct=clnk&gl=cz>
- [7] BROUČEK, Jan a DVOŘÁK, Pavel. *FTTx - technologie pro poslední míli* [online]. [cit. 2014-10-27]. Dostupné z: <http://www.netguru.cz/odborne-clanky/fttx-technologie-pro-posledni-mili.html>
- [8] LAFATA, Pavel a VODRÁŽKA, Jiří. *Pasivní optická síť GPON* [online]. 2009 [cit. 2014-11-15]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2009050002>
- [9] LAFATA, Pavel. *Pasivní optické sítě WDM-PON* [online]. 24.5.2009 [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2009050004>
- [10] BURČÍK, J. *Ramanovské zesilovače pro telekomunikaci* [online]. 29.3.2006 [cit. 2014-11-27]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006032401>
- [11] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna* [online]. 2006 [cit. 2015-4-20]. Dostupné z: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [12] Laude, Jean-Pierre. *DWDM fundamentals, Components, and Applications*. Artech House, 2002. 282 s. ISBN 1-58053-177-6
- [13] Betou, Einar In De, C. Bunge, M. Olson. *WDM-PON is a key component in next generation access* [online]. 7.3.2014. [cit. 2015-4-20]. Dostupné z: <http://www.lightwaveonline.com/articles/print/volume-31/issue-2/features/wdm-pon-is-a-key-component-in-next-generation-access.html>

Seznam příloh

| | | |
|------------|---|----|
| Příloha A: | Celkové schéma sítě | I |
| Příloha B: | Optická spektra jednotlivých pásem | II |
| Příloha C: | Tabulky výkonové a útlumové bilance | V |

Součástí BP je CD.

Adresářová struktura přiloženého CD:

1. Elektronická verze bakalářské práce
2. Simulace širokopásmové FTTx přípojky na architektuře WDM-PON sítě

Seznam obrázků

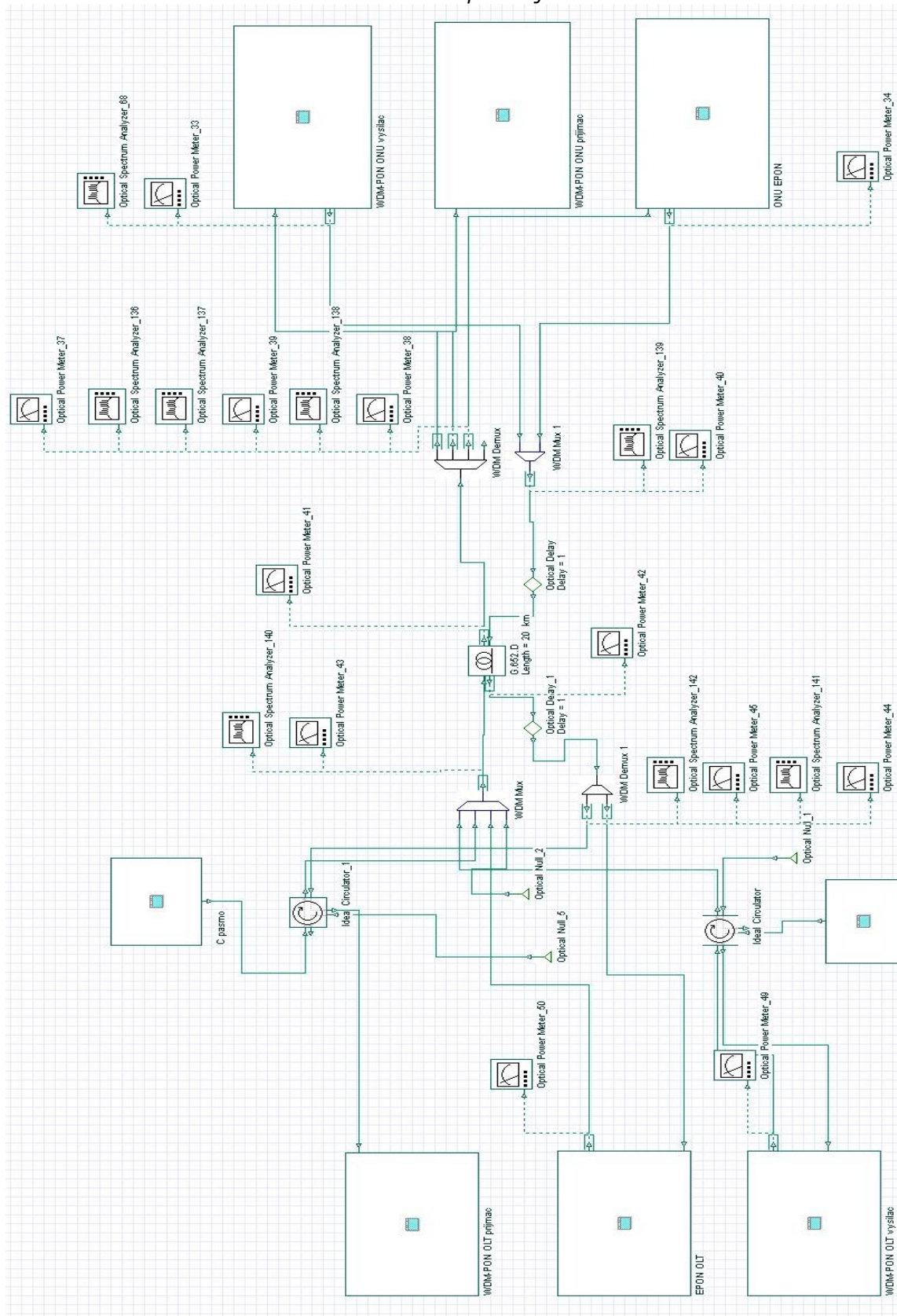
| | |
|---|----|
| Obrázek 1.1: Jednovidové a mnohovidové vlákno [2] | 2 |
| Obrázek 1.2: Útlumové spektrum jednovidového optického vlákna [3] | 4 |
| Obrázek 2.1: Základní rozdělení optických přístupových sítí | 6 |
| Obrázek 2.2: Funkční struktura optických sítí OAN | 7 |
| Obrázek 2.3: Základní typy FTTx přípojek | 8 |
| Obrázek 3.1: Architektura PON [2] | 11 |
| Obrázek 3.2: Hvězdicová topologie | 12 |
| Obrázek 3.3: Rozšířená stromová topologie | 12 |
| Obrázek 3.4: Sběrníková topologie | 12 |
| Obrázek 3.5: Kruhová topologie | 13 |
| Obrázek 4.1: WDM pasivní optická síť [1] | 17 |
| Obrázek 4.2: Kanály CWDM definované dle ITU-T G.694.2 [9] | 18 |
| Obrázek 4.3: Princip AWG [12] | 24 |
| Obrázek 5.1: Schéma širokopásmové FTTx přípojky na architektuře WDM-PON | 26 |
| Obrázek 5.2: Schéma vysílací části OLT jednotky WDM-PON | 27 |
| Obrázek 5.3: Schéma bloku jednoho Fabry-Perot laseru | 28 |
| Obrázek 5.4: Schéma bloku L pásma | 29 |
| Obrázek 5.5: Schéma bloku OLT EPON | 29 |
| Obrázek 5.6: Schéma ODN jednotky | 30 |
| Obrázek 5.7: Schéma přijímače WDM-PON | 31 |
| Obrázek 5.8: Schéma bloku ONU EPON | 32 |
| Obrázek 5.9: Spektrum vlnových délek za WDM multiplexem, směr sestupný | 32 |
| Obrázek 5.10: Spektrum vlnových délek za WDM multiplexem, směr vzestupný | 33 |
| Obrázek 5.11: Diagram oka s vyznačenými parametry | 39 |
| Obrázek 5.12: Diagram oka pro sestupný a vzestupný směr jednotek EPON ve vzdálenosti 5 km | 40 |
| Obrázek 5.13: Diagram oka pro sestupný a vzestupný směr jednotek WDM-PON ve vzdálenosti 5 km | 40 |
| Obrázek 5.14: Diagram oka pro sestupný a vzestupný směr jednotek EPON ve vzdálenosti 10 km | 41 |
| Obrázek 5.15: Diagram oka pro sestupný a vzestupný směr jednotek WDM-PON ve vzdálenosti 10 km | 41 |
| Obrázek 5.16: Diagram oka pro sestupný a vzestupný směr jednotek EPON ve vzdálenosti 20 km | 42 |
| Obrázek 5.17: Diagram oka pro sestupný a vzestupný směr jednotek WDM-PON ve vzdálenosti 20 km | 42 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tabulka 3.1: Porovnání jednotlivých standardů PON | 16 |
| Tabulka 4.1: Porovnání jednotlivých zesilovačů | 23 |
| Tabulka 5.1: Parametry optického vlákna | 30 |
| Tabulka 5.2: Q-faktor a bitová chybovost EPON sítě ve vzdálenostech 5, 10 a 20 km | 34 |
| Tabulka 5.3: Q-faktor a bitová chybovost pro kanály WDM-PON, směr sestupný | 35 |
| Tabulka 5.4: Q-faktor a bitová chybovost pro kanály WDM-PON, směr vzestupný | 36 |
| Tabulka 5.5: Výkonová a útlumová bilance s délkou optického vlákna 5 km, směr sestupný | 37 |
| Tabulka 5.6: Výkonová a útlumová bilance s délkou optického vlákna 5 km, směr vzestupný | 38 |
| Tabulka 5.7: Celkový útlum na trase | 38 |

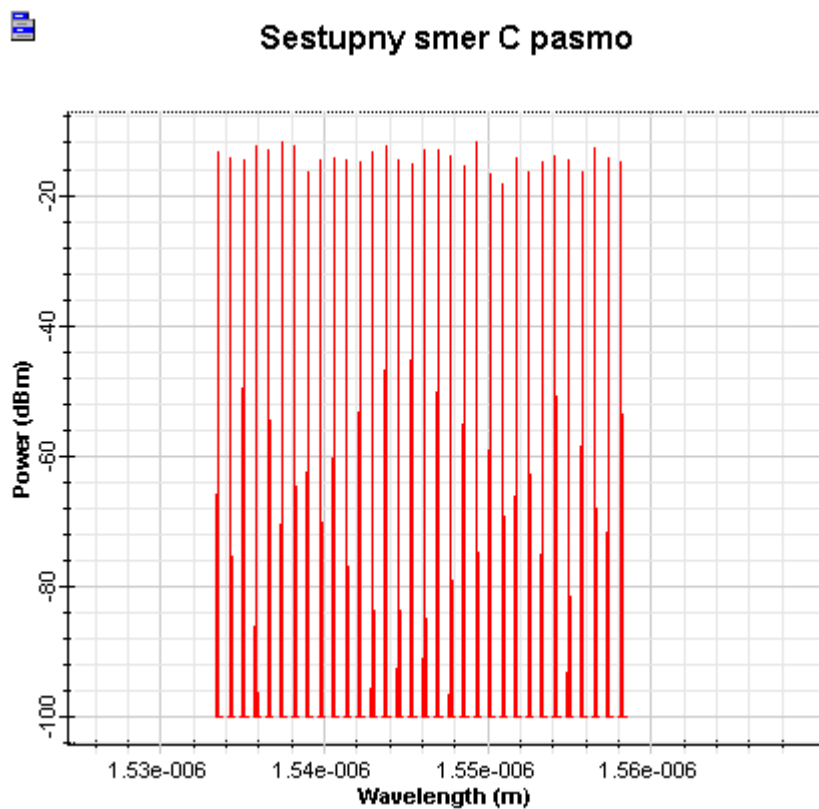
Příloha A

Obrázek A.1: Celkové schéma sítě s měřicími přístroji

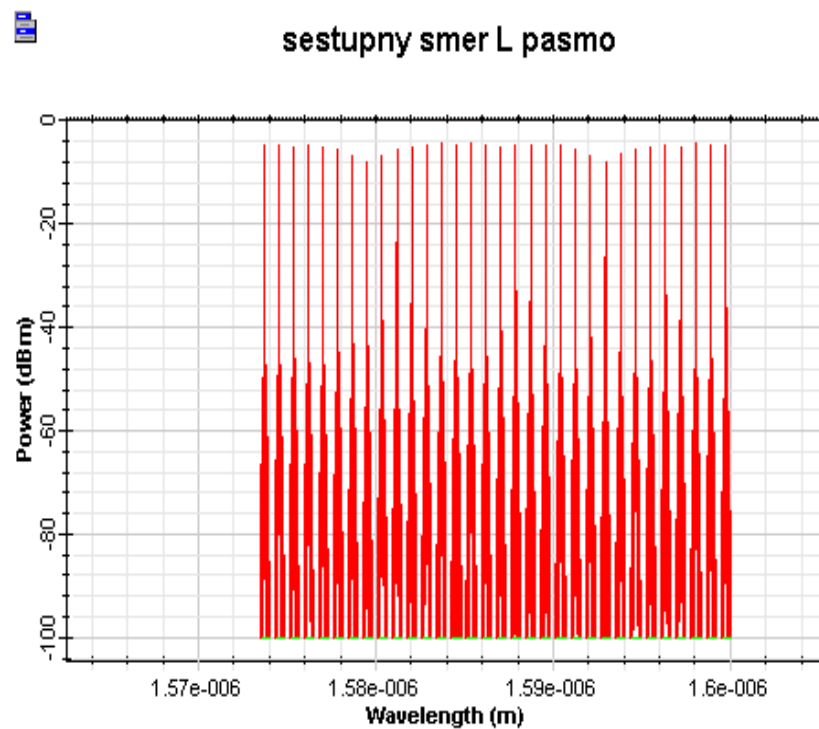


Příloha B

Obrázek B.1: *Spektrum vlnových délek pro naladění FP lasery na straně ONU*



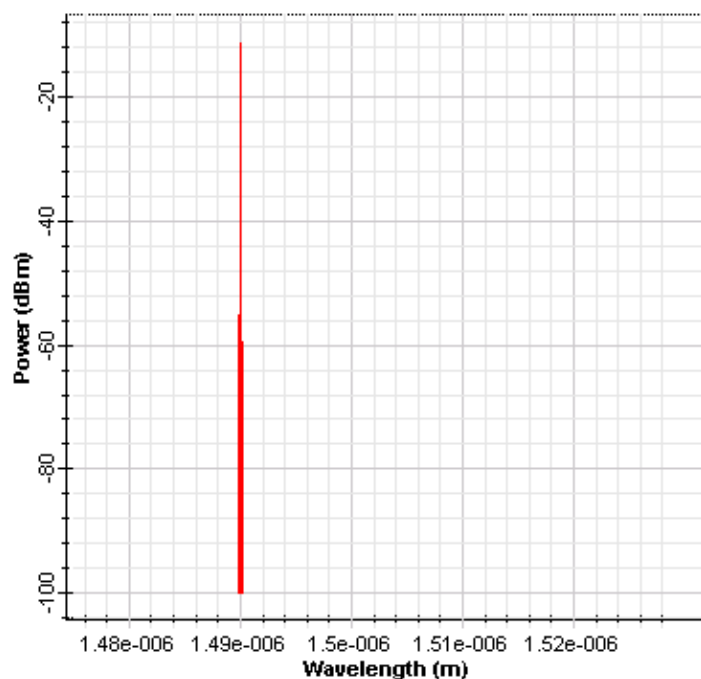
Obrázek B.2: *Spektrum vlnových délek pro naladění FP lasery na straně OLT*



Obrázek B.3: *Spektrum vysílače EPON na straně OLT*



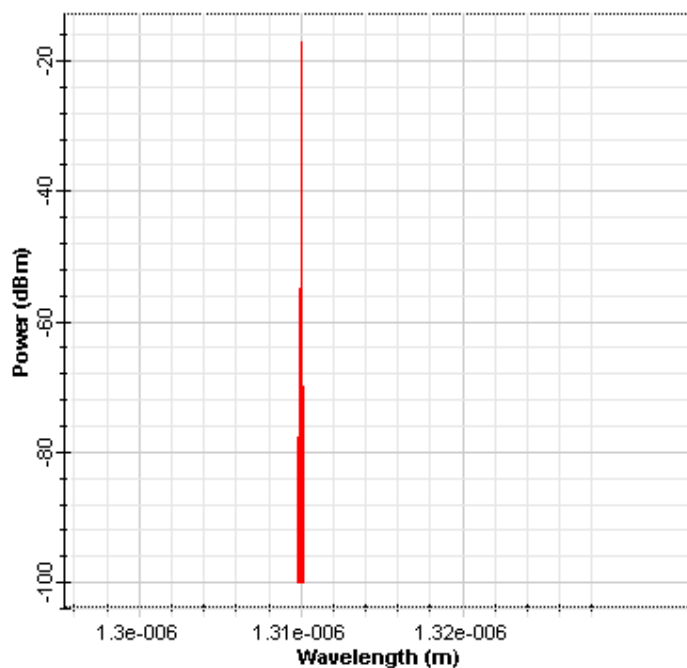
Sestupny smer 1490 nm



Obrázek B.3: *Spektrum vysílače EPON na straně ONU*



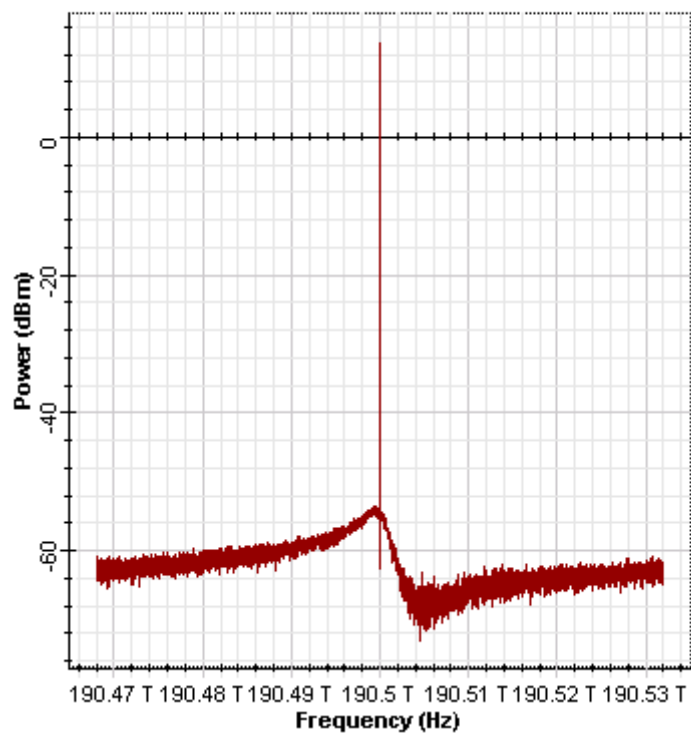
Vzestupny smer 1310 nm



Obrázek B.4: *Optické spektrum jednoho FP laseru*



Optical Spectrum Analyzer_55



Příloha C:

Tabulka C.1: Výkonová a útlumová bilance s délkou optického vlákna 10 km, směr sestupný

| Místo měření | | Úroveň signálu [dBm] | Útlumová bilance [dBm] |
|---|---------|----------------------|------------------------|
| Výstup z L pásma | | 29,047 | - |
| Výstup z C pásma | | 15,048 | - |
| Výstup z WDM-PON OLT vysílače (L pásmo) | | 19,777 | -9,27 |
| Výstup z EPON OLT (1490 nm) | | 3,378 | - |
| Výstup z WDM mux | L pásmo | 18,082 | -1,695 |
| | C pásmo | 18,082 | +3,034 |
| | 1490 nm | 18,082 | +14,704 |
| Výstup za vláknem | | 15,711 | -2,371 |
| Výstup z WDM demux | L pásmo | 11,378 | -4,333 |
| | C pásmo | 6,648 | -9,063 |
| | 1490 nm | -5,022 | 20,733 |
| Vstup do WDM-PON ONU přijímač | | -8,127 | -19,505 |
| Vstup do ONU EPON | | -17,168 | 22,19 |

Tabulka C.2: Výkonová a útlumová bilance s délkou optického vlákna 10 km, směr vzestupný

| Místo měření | | Úroveň signálu [dBm] | Útlumová bilance [dBm] |
|---|---------|----------------------|------------------------|
| Výstup z WDM-PON ONU vysílače (C pásmo) | | 16,093 | - |
| Výstup z ONU EPON (1310 nm) | | -11,099 | - |
| Výstup z WDM mux | C pásmo | 13,102 | -2,991 |
| | 1310 nm | 13,102 | +24,201 |
| Výstup za vláknem | | 10,716 | -2,386 |
| Výstup z WDM demux | C pásmo | 7,706 | -3,01 |
| | 1310 nm | -19,499 | -30,215 |
| Vstup WDM-PON OLT přijímač | | -11,848 | -19,554 |
| Vstup EPON OLT | | -19,499 | - |

Tabulka C.3: Výkonová a útlumová bilance s délkou optického vlákna 20 km, směr sestupný

| Místo měření | | Úroveň signálu [dBm] | Útlumová bilance [dBm] |
|---|---------|----------------------|------------------------|
| Výstup z L pásma | | 29,047 | - |
| Výstup z C pásma | | 15,048 | - |
| Výstup z WDM-PON OLT vysílače (L pásmo) | | 19,793 | -9,254 |
| Výstup z EPON OLT (1490 nm) | | 3,123 | - |
| Výstup z WDM mux | L pásmo | 18,117 | -1,676 |
| | C pásmo | 18,117 | +3,069 |
| | 1490 nm | 18,117 | +14,994 |
| Výstup za vláknem | | 13,318 | -4,799 |
| Výstup z WDM demux | L pásmo | 8,993 | -4,325 |
| | C pásmo | 4,248 | -8,89 |
| | 1490 nm | -7,676 | -20,994 |
| Vstup do WDM-PON ONU přijímač | | -10,414 | -19,407 |
| Vstup do ONU EPON | | -19,697 | -12,021 |

Tabulka C.4: Výkonová a útlumová bilance s délkou optického vlákna 20 km, směr vzestupný

| Místo měření | | Úroveň signálu [dBm] | Útlumová bilance [dBm] |
|---|---------|----------------------|------------------------|
| Výstup z WDM-PON ONU vysílače (C pásmo) | | 15,986 | - |
| Výstup z ONU EPON (1310 nm) | | -11,168 | - |
| Výstup z WDM mux | C pásmo | 12,95 | -3,036 |
| | 1310 nm | 12,95 | +24,118 |
| Výstup za vláknem | | 8,199 | -4,751 |
| Výstup z WDM demux | C pásmo | 5,186 | -3,013 |
| | 1310 nm | -21,969 | -30,168 |
| Vstup WDM-PON OLT přijímač | | -14,367 | -19,553 |
| Vstup EPON OLT | | -21,969 | - |